1.19

Spektrum

der Wissenschaft

www.Spektrum.de 1.19

8,50 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

Was ist der Mensch?

Warum wir einzigartig sind

TIEFSEEBERGBAU Gefährlicher Goldrausch am Meeresgrund

MATHEMATIK Unlösbare physikalische Probleme

KREBSTHERAPIE Mit Darmmikroben gegen Tumoren




Wenn ein Chip zur Chance wird.
Mit einem Netzhaut-Implantat für unsere Versicherten.
Fortschritt leben. Die Techniker
dietechniker.de
Die Techniker



EDITORIAL
EIN GANZ BESONDERES TIER

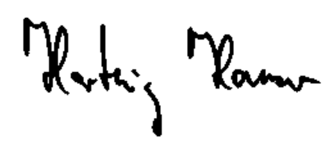
Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Normalerweise betreiben wir bei **Spektrum** der Wissenschaft keine Nabelschau, sondern richten den Blick eher nach außen und präsentieren etwa Forschungen zum Kosmos, zum Klima oder zu medizinischen Problemen. Jetzt rücken wir uns aber doch einmal selbst ins Rampenlicht, und das gleich in Form einer sechsteiligen Serie zur Frage »Was ist der Mensch?«: Worin besteht eigentlich das Besondere an unserer Spezies, in Abgrenzung zu anderen hoch entwickelten Tieren? Wie einzigartig sind wir wirklich, und warum ist das so? In dieser Ausgabe beleuchtet zunächst der Verhaltens- und Evolutionsbiologe Kevin Laland ab S. 12 unsere ausgeprägte Fähigkeit, Wissen an andere weiterzugeben – kurz gesagt unsere Kultur. Der Psychologe Thomas Suddendorf analysiert dann ab S. 20 die kognitiven Unterschiede zwischen Mensch und Tier. Weitere Artikel in den folgenden Heften behandeln die Entstehung von Sprache, die Menschwerdung in der Evolution, die Entwicklung von Moral sowie die Erfindung des Kriegs.

Der schwierigste Aspekt ist vielleicht das Bewusstsein, um das es in der kommenden Ausgabe geht. Warum können wir über uns selbst nachdenken und von uns als »Ich« sprechen – und wieweit findet sich die Fähigkeit auch bei anderen intelligenten Tieren? Das Bewusstsein eines Selbst hängt mit den übrigen erwähnten Themen eng zusammen, denn ohne dieses gäbe es wohl kaum Sprache, Moral oder Krieg. Es hat dem Menschen völlig neue Entwicklungsmöglichkeiten erschlossen, ist aber gleichzeitig auch seine Achillesferse: Wer sich seiner selbst bewusst ist, ist sich ebenso seiner Endlichkeit bewusst, seiner Bedeutungslosigkeit und seiner Unterlegenheit. Die mentalen Kompensationsmechanismen, mit deren Hilfe Menschen versuchen damit umzugehen – von Stammesdenken über Religionsfanatismus bis zur Flucht in Süchte und materiellen Gewinn –, stellen die Menschheit als Ganzes heute vor existenzielle Probleme. Es bleibt zu hoffen, dass wir diese dank Fähigkeiten wie der in diesem Heft betrachteten Kultur und Kognition lösen können.

Mit der Januarausgabe gibt es zudem ein Jubiläum zu feiern: Seit 10 Jahren erläutert der preisgekrönte Physikdidaktiker Hans-Joachim Schlichting in seiner nach ihm benannten Kolumne die verschiedensten Phänomene der Alltagsphysik, von farbenprächtigen Lichtbrechungen im Schnee bis zu den mysteriösen Schichten in einem Latte macchiato. Gerade der Kaffee scheint es ihm angetan zu haben, untersuchte er doch bereits in seinem ersten Beitrag im Januar 2009 das Verhalten von Kaffeeflecken in der Tischdecke. Alle Schlichting-Fans können sich schon auf den 15. Februar 2019 freuen; dann erscheint bereits zum dritten Mal eine Zusammenstellung seiner Beiträge als **Spektrum** SPEZIAL Sonderheft.

Herzlich grüßt Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 4.18 gibt einen Einblick in die faszinierende Welt der Algebra und ihrer vielfältigen Verknüpfungen zu anderen mathematischen Disziplinen.

IN DIESER AUSGABE



PAT SCHEIDEMANN

ULF RIEBESELL

Im Interview mit **Spektrum** diskutiert der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preisträger ab S. 50 über die Zukunft der Meere.





ANDREAS BATTENBERG, TUM

TONY S. CUBITT
DAVID PÉREZ-GARCÍA
MICHAEL WOLF

Ein Engländer, ein Spanier und ein Deutscher haben ein esoterisch anmutendes Problem aus der mathematischen Logik auf handfeste Physik übertragen (S. 66).





MICHAELA HARBECK
BRIGITTE HAAS-GEBHARD
JOACHIM BURGER

Was haben länglich geformte Frauenschädel in spätantiken Gräbern Bayerns zu bedeuten? Ein Expertenteam aus Archäologie, Anthropologie und Paläogenetik versucht ab S. 78, die Frage zu beantworten.

INHALT

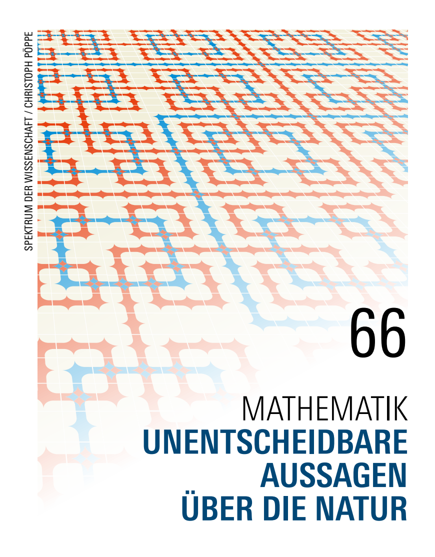


PINDARO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT


FOTO: BRETT STEVENS



SPACEJUNK3D, LLC (WWW.ESA.INT/SPACEINIMAGES/IMAGES/2013/06/SPACE_DEBRIS)


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE



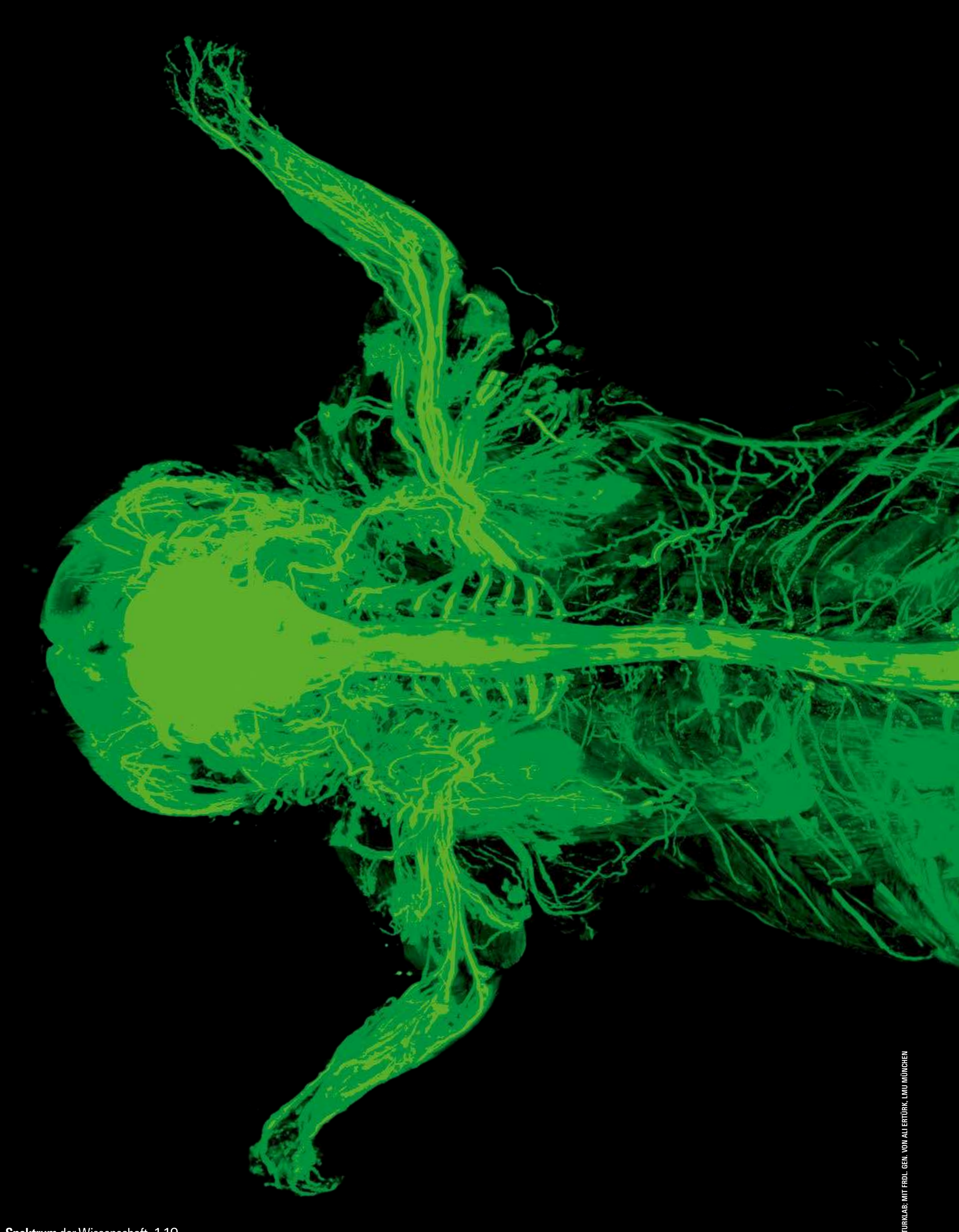
STAATSSAMMLUNG FÜR ANTHROPOLOGIE UND PALÄOANATOMIE, MÜNCHEN

Titelbild: cosmin4000 / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



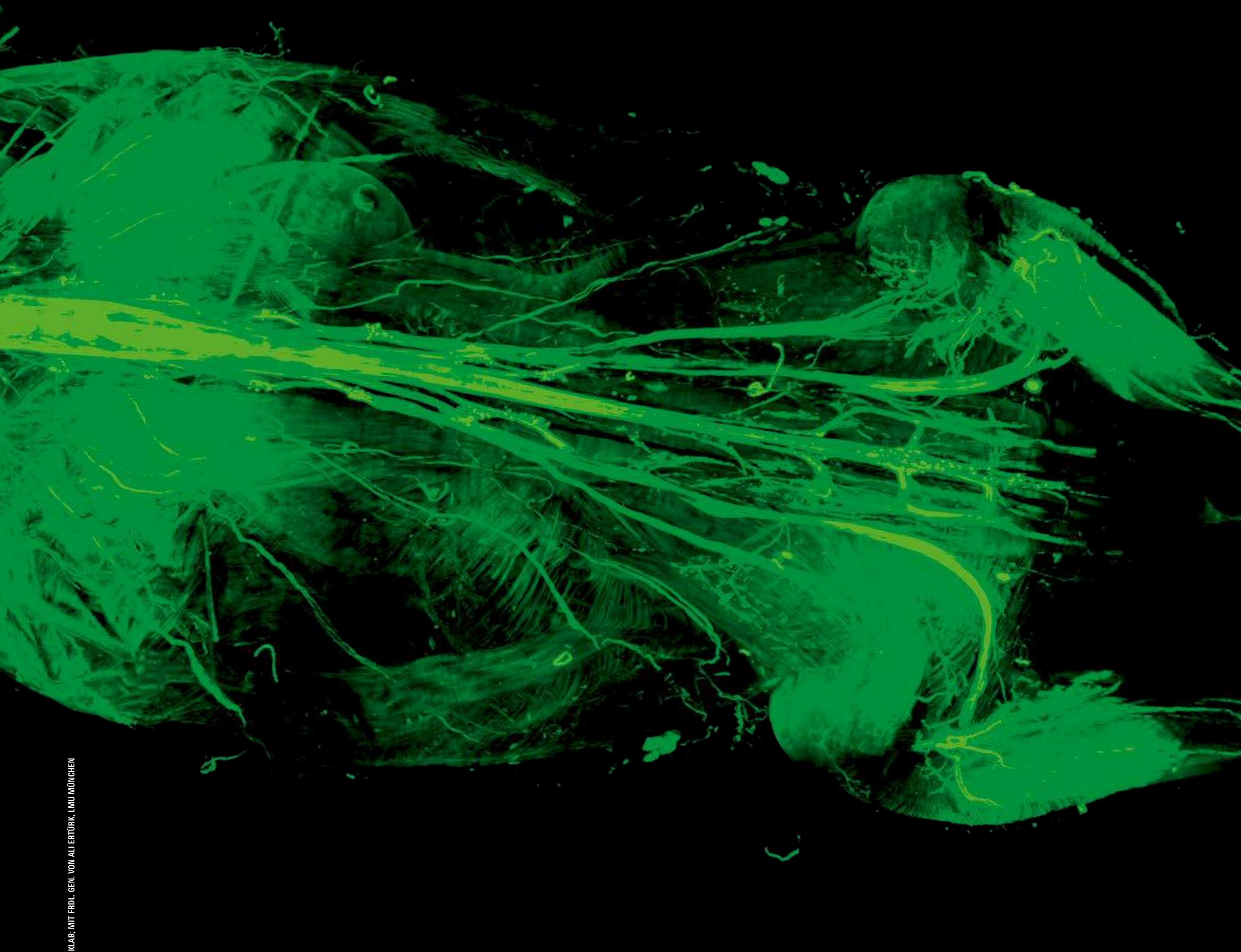
ERTURKLAB; MIT FRDL. GEN. VON ALI ERTÜRK, LMU MÜNCHEN

DURCHLEUCHTETE MAUS

In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler immer bessere Methoden entwickelt, um ins Innere von toten Tieren zu blicken. Beispielsweise entfernen sie bei Mäusen die Hautpigmente und Licht absorbierende Fette, wodurch die Körper durchsichtig werden. Die Tiere sind in der Regel genetisch so manipuliert, dass sie fluoreszierende Proteine gebildet haben, deren Leuchten sich im Mikroskop erkennen lässt. Jedoch ist dieses oft nur sehr schwach.

Ein Team um Ali Ertürk vom Klinikum der Universität München hat nun ein Verfahren entwickelt, das diese Schwächen ausbügelt. Die vDISCO genannte Technik verwendet unter Druck eingebrachte spezielle Antikörper, die besonders klein sind (»Nanobodies«) und sich jeweils an zellspezifische Proteine anheften, beispielsweise solche für Nervengewebe. Das resultierende Fluoreszenzsignal ist so stark, dass selbst feinste Details im Nervensystem der Maus sichtbar werden.

bioRxiv 10.1101/374785, 2018



ERTURKLAB; MIT FRDL. GEN. VON ALI ERTÜRK, LMU MÜNCHEN

ARCHÄOLOGIE
STEINZEITKUNST AUS BORNEO

Malereien aus Indonesien könnten älter sein als vergleichbare Steinzeitkunst des *Homo sapiens* in Europa. Darauf deutet das Bild von rinderartigen Tieren in der Höhle Lubang Jeriji Saléh im Osten der Insel Borneo hin. Archäologen haben die Zeichnung bereits in den 1990er Jahren entdeckt. Nun hat ein Team um Maxime Aubert von der Griffith University in Australien sie genauer als zuvor datiert und kommt auf ein Mindestalter von 40 000 Jahren. Andere Funde aus der Region könnten sogar noch früher entstanden sein, berichten die Forscher.

Damit sind die Höhlenmalereien auf Borneo möglicherweise älter als die ersten Figurenkunstwerke des *Homo sapiens* aus Europa. Die berühmten Wandgemälde aus der französischen Grotte de Chauvet kommen beispielsweise auf höchstens 37 000 Jahre. Auch Statuetten aus Mammutelfenbein von der Schwäbischen Alb wie der Löwenmensch vom Hohlenstein-Stadel entstanden wohl vor rund 40 000 Jahren.

Ob sich unsere Vorfahren auf Borneo, das damals noch zum eurasischen Festland gehörte, wirklich vor ihren europäischen Verwandten künstlerisch betätigten, müssen weitere Studien zeigen. Bei vielen Felsmalereien ist das genaue Alter noch unbekannt, es könnte also immer wieder Überraschungen geben.

Das Team um Aubert konnte das Bild aus Lubang Jeriji Saléh nun dank Kalkablagerungen, die sich über und unter der Farbe gebildet haben, genauer eingrenzen. Anhand des Mengenverhältnisses der im Kalk eingelagerten radioaktiven Uranisotope zu deren Zerfallsprodukt Thorium ermittelten die Forscher ein Mindest- und ein Höchstalter der Malerei.

Den Altersrekord für figürliche Steinzeitkunst hält derweil nach wie vor ein Tierbild aus der spanischen Höhle La Pasiega. Es soll 65 000 Jahre alt sein, stammt damit aber vermutlich von Neandertalern (**Spektrum** April 2018, S. 8).

Nature 10.1038/s41586-018-0679-9, 2018

LUC-HENRI FAGE



Das Gemälde auf Borneo zeigt rinderartige Tiere.

KOSMOLOGIE
UMBENENNUNG DES HUBBLE-GESETZES

Die Internationale Astronomische Union (IAU) hat sich für die Umbenennung eines der Meilensteine der Kosmologie ausgesprochen: Das so genannte Hubble-Gesetz steht für die empirische Erkenntnis, dass sich das Weltall immer weiter ausdehnt. Seine bisherige Bezeichnung verdankt es dem US-Astronomen Edwin Hubble (1889–1953), der 1929 beobachtete, dass sich weiter entfernte Galaxien mit größerer Geschwindigkeit von uns wegbewegen als näher gelegene (siehe **Spektrum** Juli 2018, S. 12).

Hubble war jedoch nicht der Einzige, der vor rund 90 Jahren zu diesem Schluss kam. Bereits 1927 hatte der belgische Priester und Astronom Georges Lemaître (1894–1966) entdeckt, dass die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie einen sich ausdehnenden Kosmos zulassen. Lemaître sah diese Expansion – die dem damaligen Weltbild eines statischen Universums widersprach – auch in Beobachtungsdaten bestätigt.

Lemaître veröffentlichte seine Theorie jedoch in einer wenig beachteten Brüsseler Fachzeitschrift, und noch dazu auf Französisch. Erst 1931, als er die Arbeit auf Englisch übersetzte, nahm die internationale Fachwelt davon Notiz. Lemaître ließ bei der Übersetzung jedoch einen Absatz aus, der die Bedeutung seiner Entdeckung verdeutlichte, offenbar aus Beschei-


SCIENCE PHOTO LIBRARY


SCIENCE PHOTO LIBRARY

Bisher gilt den meisten Edwin Hubble (rechts) als Entdecker des expandierenden Universums. Dabei gelangte Georges Lemaître (links) bereits Jahre vor ihm zu der Erkenntnis, dass sich das All ausdehnt.

denheit. Die Relation zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien wurde daher fortan nur mit Hubbles Namen verknüpft.

Die IAU will diese historische Ungerechtigkeit nun geraderücken. Sie hat daher eine Online-Umfrage durchgeführt, an der 4060 ihrer rund 11000 stimmberechtigten Mitglieder teilnahmen. 78 Prozent votierten dafür, künftig vom Hubble-Lemaître-Gesetz zu sprechen. Offen ist, ob sich alle Astronomen daranhalten werden. 2006 hatte die IAU entschieden, Pluto nicht länger als Planet zu bezeichnen, was bei einigen Himmelsforschern bis heute auf Widerstand stößt.

IAU-Pressemitteilung, Oktober 2018

ORNITHOLOGIE
DAS GEHEIMNIS DES ATLANTISVOGELS

Bis nach Brasilien sind es 3500 Kilometer, bis nach Südafrika 2800. Damit gehört die im Atlantik gelegene Inaccessible Island zu den am weitesten vom Festland entfernten Inseln der Erde. In der Nähe befinden sich nur weitere kleine Eilande, die zu Großbritannien gehören. Aber hier existiert die kleinste flugunfähige Vogelart der Welt. Wie die Atlantisralle *(Atlantisia rogersi)* auf die abgelegene Insel gelangt ist, beschäftigt Biologen seit rund 100 Jahren.

Bereits 1923 beschrieb der damalige Kurator der Vogelsammlung des British Museum for Natural History Percy Lowe (1870–1948) die Vogelgattung und gab ihr den Namen Atlantisia. Er nahm an, die Vorfahren der Tiere seien über eine in der Zwischenzeit im Meer versunkene Landbrücke nach Inaccessible gekommen. Dagegen sprechen aus heutiger Sicht jedoch geologische Erkenntnisse: Die Insel ist erst drei bis sechs Millionen Jahre alt und entstand durch einen mittlerweile erloschenen Vulkan, der nie kontinentale Anbindung besaß.

Die sperlinggroßen Vögel mussten also entweder damals noch flugfähig gewesen sein oder auf Treibgut das Meer überquert haben. Aber von woher kamen sie? Martin Stervander von der schwedischen Universität Lund und seine Kollegen haben nun die DNA der Atlantisrallen mit verwandten Spezies aus Afrika und Amerika verglichen. Das Ergebnis spricht dafür, dass die Insulaner vom Fleckensumpfhuhn *(Porzana spiloptera)* aus Südamerika abstammen. Ihre Vorfahren besiedelten wahrscheinlich vor rund 1,5 Millionen Jahren die Insel.

Die Analyse offenbarte zudem, dass beide Arten bisher einer falschen Gattung zugeordnet wurden – sie gehören eigentlich zum Genus Laterallus, dessen Mitglieder überwiegend kleine, eher düster gefärbte Kranichvögel sind, die schlecht fliegen können. Die Atlantisralle verlor diese Eigenschaft offenbar komplett, als sie sich an die Umweltbedingungen auf Inaccessible anpasste. Dort drohen starke Winde die kleinen Vögel aufs Meer hinauszuwehen; gleichzeitig fehlen Fressfeinde, vor denen sie wegfliegen müssten.

Mol. Phylogenet. Evol. 130, S. 92–98, 2019


PETER G. RYAN, UNIVERSITY OF CAPE TOWN

Die Atlantisralle kann nicht fliegen. Wie gelangte sie auf eine abgelegene Insel im Südatlantik?

BOTANIK
HERKUNFT DER KAKAOPFLANZE

Bisher verorteten Experten den Ursprung von Kakao in Mittelamerika. Demnach soll die Kultur der Olmeken, die vor 4000 Jahren im heutigen Mexiko lebte, die begehrte Pflanze *Theobroma cacao* als erstes kultiviert haben. Neue archäologische Funde aus Santa Ana-La Florida im Südwesten Ecuadors sprechen jedoch dafür, dass das Genussmittel bereits sehr viel früher in Südamerika angebaut wurde. Eine Arbeitsgruppe um Sonia Zarrillo von der University of Calgary hat dort auf 5300 Jahre alten Keramikscherben unter anderem das für Kakaobohnen typische Alkaloid Theobromin sowie DNA-Fragmente der Kakaopflanze entdeckt.

Andere Funde aus Santa Ana-La Florida deuten auf Handelsbeziehung mit der Pazifikküste hin. Vermutlich sei *Theobroma cacao* vom Amazonas aus nach Mesoamerika gelangt, argumentieren die Wissenschaftler. Dafür spreche auch, dass es im Regenwald Ecuadors die größte genetische Vielfalt an Kakaopflanzen gibt: In einigen Gebieten wachsen dort bis zu elf verschiedene *Theobroma*-Arten.

Von Maya und Azteken ist bekannt, dass sie aus den Bohnen der Pflanze Getränke zubereiteten, welche die Stammeseliten bei religiösen Festen zu sich nahmen. Die Bohnen dienten daneben als Zahlungsmittel. Im prähistorischen Santa Ana-La Florida scheinen aber auch andere Teile der Kakaopflanze verwendet worden zu sein. Noch heute behandeln indigene Volksgruppen in Ecuador mit den Blättern oder der Rinde Krankheiten.

Nat. Ecol. Evol., 10.1038/s41559-018-0697-x, 2018

ASTROPHYSIK
RITT ÜBER DEN EREIGNISHORIZONT

Astrophysiker haben Gaswolken aufgespürt, die mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit um das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße kreisen. Sie erreichen damit unvorstellbare 360 Millionen Kilometer pro Stunde und würden in einer Sekunde zweieinhalbmal um die Erde flitzen.

Wenn Gaswolken (blau) um ein Schwarzes Loch kreisen, geben sie manchmal Infrarotlicht ab (rot), wie diese Simulation zeigt.

Das Schwarze Loch namens Sagittarius A*, das Wissenschaftler in der Mitte unserer Galaxie vermuten, bringt Schätzungen zufolge vier Millionen Mal mehr Masse auf die Waage als unsere Sonne. Es ist von einer Scheibe aus heißem Gas und Staub umgeben, von der Teile immer wieder in das Schwarze Loch rutschen. Manche Bereiche der Scheibe kreisen hingegen noch in sicherem Abstand um das Gravitationsmonster und können sich dessen Sog gerade so widersetzen.

Die Forscher um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching haben nun Strahlung aufgefangen, die besonders heiße Gasklumpen auf einem solchen Orbit immer wieder in Richtung Erde aussenden. Diese Hotspots entstehen vermutlich, wenn sich die Magnetfelder der Gas- und Staubscheibe von einem Moment auf den anderen neu anordnen. Dadurch werden Elektronen nach außen geschleudert, wobei sie große Mengen Infrarotlicht abgeben.

Genzel und seine Kollegen haben im Sommer 2018 drei solcher Ausbrüche im Umfeld von Sagittarius A* beobachtet. Die Position der Strahlungsquellen verschob sich dabei jeweils binnen einer halben Stunde um 120 millionstel Bogensekunden. Das lasse sich am besten durch heiße Gasklumpen erklären, die mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit einen halben Orbit um das Schwarze Loch zurücklegen.

Möglich wurde die besondere Beobachtung durch das Zusammenschalten von vier Acht-Meter-Teleskopen der Europäischen Südsternwarte auf dem Cerro Paranal in Chile. Im Rahmen dieses GRAVITY-Projekts können Forscher das Zentrum der Milchstraße wesentlich detaillierter betrachten als bisher (siehe **Spektrum** Oktober 2018, S. 8).

A&A 618, L10, 2018


Pando-Pappelwald im US-Bundesstaat Utah.

USDA / FISHLAKE NATIONAL FOREST / J. ZAPELL

ÖKOLOGIE
BERÜHMTER PAPPELWALD IN GEFAHR

Er besteht aus 47000 genetisch identischen Bäumen, wiegt 6000 Tonnen und erstreckt sich auf einer Fläche so groß wie das Münchner Oktoberfest: Ein Pando (von lateinisch pandere, ausbreiten) genannter Zitterpappelwald im US-Bundesstaat Utah gilt als das größte und schwerste Lebewesen der Erde. Doch dem Organismus gehe es schlecht, warnen Paul Rogers und Darren McAvoy von der Utah State University. Seit 30 bis 40 Jahren kämen kaum noch neue Ableger des Baums empor. Das folgern die Forscher aus langen Beobachtungsreihen auf insgesamt 65 Testflächen sowie der Auswertung von Luftaufnahmen aus den vergangenen sieben Jahrzehnten.

Die Amerikanische Zitterpappel *(Populus tremuloides)* bildet ein ausgedehntes Wurzelgeflecht, aus dem immer wieder neue Schösslinge des Mutterbaums hervorsprießen. Den Forschern zufolge gefährden vor allem Pflanzenfresser wie der Maultierhirsch *(Odocoileus hemionus)* dieses Wachstum. Die Tiere grasen die jungen Bäume im großen Stil ab. Sie nähmen in dem Wald überhand, weil die Bestände von Bären, Wölfe, Pumas und anderen Raubtieren in der Region drastisch dezimiert wurden, so die Forscher.

Zwar haben Naturschützer Teile des Waldes eingezäunt. Aber der Versuch gilt im Großen und Ganzen als gescheitert, da Hirsche immer wieder niedrige Passagen der Zäune überspringen oder sich durch Lücken zwängen. Rogers und McAvoy fordern daher ein Umdenken, um Pando zu retten, dessen Wurzelsystem vermutlich viele tausend Jahre alt ist.

Eine erste Maßnahme könne sein, wieder Raubtiere in die Region einwandern zu lassen. Im Yellowstone-Nationalpark führte unter anderem die Ansiedlung von Wölfen dazu, dass sich Auwälder erholten. Hirsche, die bevorzugt das weiche Holz der jungen Bäume fraßen, mieden dadurch die Gebiete.

PLoS One 13, e0203619, 2018

PINDARO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

KULTUR

EIN EINZIGARTIGES WESEN

Wodurch unterscheidet sich der Mensch am stärksten von allen anderen Tieren? Vermutlich durch seine besonders ausgeprägte kulturelle Begabung – also in der Fähigkeit, Wissen an andere weiterzugeben.



Kevin Laland ist Professor für Verhaltens- und Evolutionsbiologie an der University of St Andrews in Schottland.

spektrum.de/artikel/1609498


PINDARO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
NEUE SERIE
Was ist der Mensch?
Teil 1: Januar 2019
Ein einzigartiges Wesen
Kevin Laland
Schlaue Köpfe
Thomas Suddendorf
Teil 2: Februar 2019
Das schwierigste Problem
Susan Blackmore
Unterschiedlich verdrahtet
Chet C. Sherwood
Teil 3: März 2019
Der Rede wert
Christine Kenneally
Teil 4: April 2019
Die letzte ihrer Gattung
Kate Wong
Teil 5: Mai 2019
Die Geburt des »Wir»
Michael Tomasello
Teil 6: Juni 2019
Warum wir kämpfen
R. Brian Ferguson

Die meisten Leute gehen wie selbstverständlich davon aus, dass der Mensch etwas Besonderes ist und sich von den Tieren grundlegend unterscheidet. Mancher Forscher reagiert dagegen eher zurückhaltend, wenn es um die Einzigartigkeit des *Homo sapiens* geht. Doch eine Fülle handfester wissenschaftlicher Fakten aus den verschiedensten Fachgebieten von der Ökologie bis zur Kognitionspsychologie bestätigt mittlerweile tatsächlich: *Homo sapiens* stellt eine wahrhaft bemerkenswerte Spezies dar.

Bereits die menschliche Bevölkerungsdichte übersteigt alles, was für Tiere unserer Größe typisch wäre. Wir besiedeln zudem ein außergewöhnlich umfangreiches geografisches Verbreitungsgebiet und kontrollieren hier in beispielloser Weise Energie- und Materieströme – unsere globale Wirkung steht außer Frage. Mit unserer Intelligenz, unserem Kommunikationsgeschick sowie unserer Fähigkeit, Wissen zu erwerben und zu teilen – ganz zu schweigen von unseren Leistungen in Kunst, Architektur oder Musik – ragen wir Menschen als ein ganz besonderes Tier heraus. Mit unserer Kultur scheinen wir uns von der Natur abzugrenzen, und doch muss auch sie ein Produkt der Evolution sein.

Die Aufgabe, die Evolution der kognitiven menschlichen Fähigkeiten und ihren Ausdrucksformen in der Kultur wissenschaftlich zu erklären, nenne ich »Darwins Unvollendete«. Denn der Vater der Evolutionstheorie, Charles Darwin (1809–1882), widmete sich diesem Problem schon vor 150 Jahren, aber seine Kenntnisse hierüber blieben, wie er selbst einräumte, »unvollkommen« und »bruchstückhaft«. Andere Wissenschaftler griffen später das Thema auf, aber erst heute glauben etliche von uns, die auf diesem Gebiet forschen, dass wir einer Antwort näherkommen.

Nach übereinstimmender Meinung wurzeln die Errungenschaften der Menschheit in der Fähigkeit, Kenntnisse und Fertigkeiten von anderen zu übernehmen. Auf diesem Wissensreservoir, das sich über lange Zeit ansammelte, baut der Einzelne dann immer wieder auf. Der gemeinsame Erfahrungsschatz ermöglicht es, immer leistungsfähigere und vielfältigere Lösungen für die Herausforderungen des Lebens zu finden. Nicht unser großes Gehirn, unsere Intelligenz oder die Sprache hat uns die Kultur beschert, sondern die Kultur stattete uns mit diesen Gaben aus. Für unsere Spezies und vielleicht auch für einige andere biologische Arten veränderte die Kultur den Evolutionsprozess.

Beim Begriff »Kultur« denkt man vielleicht an Opern oder Feinschmeckerküche; wissenschaftlich betrachtet verbergen sich dahinter Verhaltensmuster, die Mitglieder einer Gemeinschaft teilen und die auf sozial übermittelter Information basieren. Ob es sich um Autodesigns, Popmusikstile, wissenschaftliche Theorien oder um die Nahrungsbeschaffungsstrategien von einzelnen Populationen dreht – alles resultiert aus einer unendlichen Reihe von Innovationszyklen, die eine ursprüngliche Wissensgrundlage immer weiter verfeinert. Im ständigen, erbarmungslosen Kopieren und Erneuern liegt das Erfolgsgeheimnis unserer Spezies.

Durch Vergleichen zwischen Mensch und anderen Tieren können Wissenschaftler feststellen, in welcher Hinsicht wir uns auszeichnen, welche Eigenschaften wir mit anderen Arten teilen und wann sich bestimmte Merkmale in der Evolution entwickelt haben. Um zu verstehen, wie *Homo sapiens* zu etwas Besonderem wurde, gilt es also, zunächst das soziale Lernen und die Innovationen bei anderen Lebewesen zu erforschen. Solche Untersuchungen offenbaren die subtilen, aber entscheidenden Unterschiede, die uns zu etwas Einzigartigem machen.

Viele Tiere pflegen Traditionen; manche machen sogar »Erfindungen«

Etliche Tiere ahmen das Verhalten anderer Individuen nach und lernen so, wie sie Nahrung finden oder sich vor Raubtieren schützen, aber auch, was einzelne Rufe und Gesänge bedeuten. Berühmt sind die charakteristischen Traditionen des Werkzeuggebrauchs bei verschiedenen Schimpansenpopulationen in Afrika. In jeder Gemeinschaft erlernen die Jungen das in ihrer Region übliche Verhalten – wie das Knacken von Nüssen mit einem Stein oder das Stochern nach Ameisen mit einem Stock –, indem sie erfahrenere Artgenossen nachahmen. Aber soziales Lernen beschränkt sich nicht nur auf Primaten oder allgemein Tiere mit einem großem Gehirn. Tausende von Studien haben Nachahmungsverhalten bei Hunderten von Säugetier-, Vogel-, Fisch- und sogar Insektenarten nachgewiesen. So ziehen etwa junge Taufliegenweibchen solche Männchen als Paarungspartner vor, die ältere Weibchen zuvor bereits ausgewählt hatten.

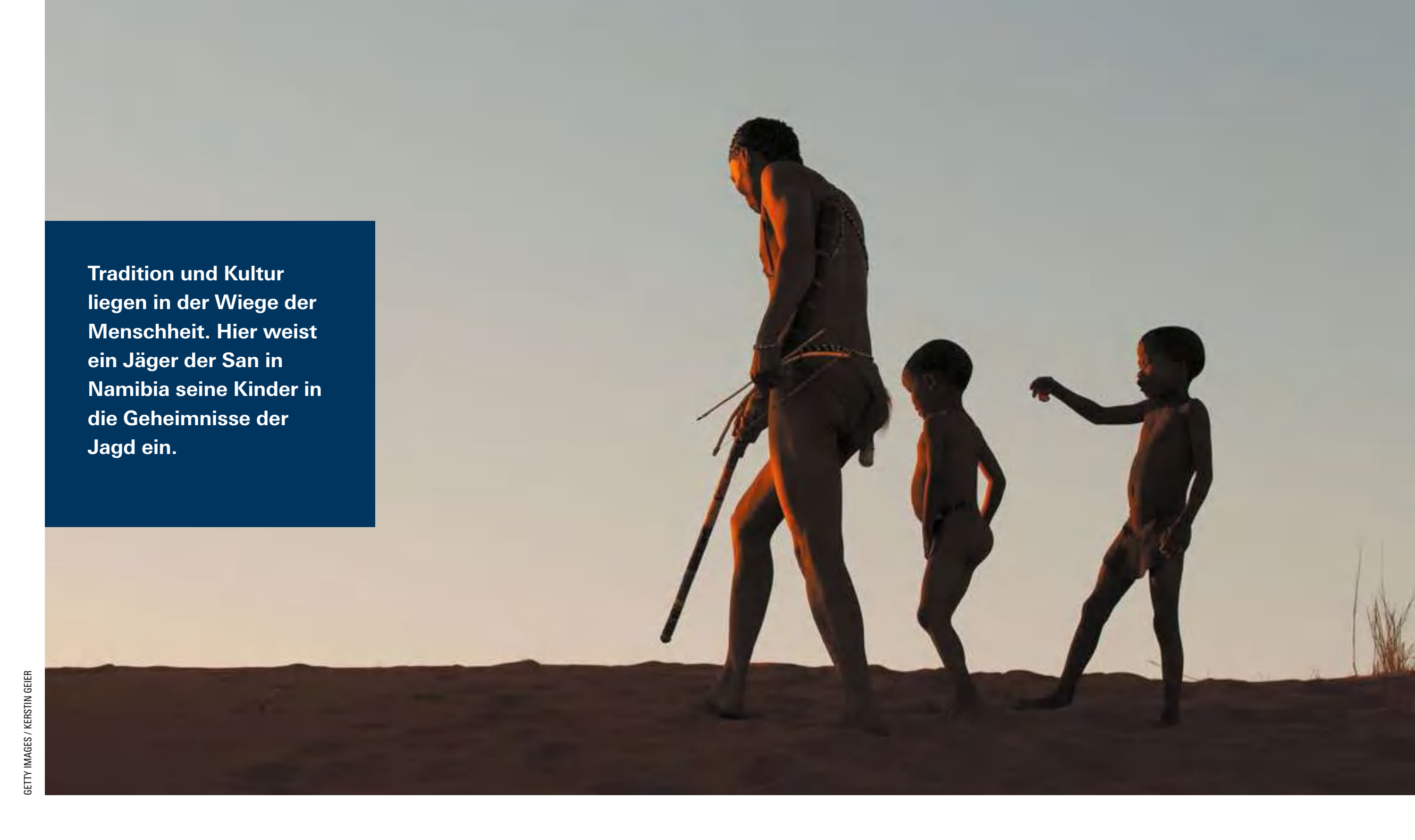
Ein breites Spektrum von Verhaltensweisen wird sozial erlernt. Bei Delfinen gibt es die Tradition, mit Meeresschwämmen Fische aufzuscheuchen, die sich auf dem Meeresboden verstecken. Schwertwale jagen Robben, indem sie diese von einer Eisscholle durch eine von ihnen erzeugte heftige Welle herunterreißen. Selbst Hühner schauen kannibalistische Neigungen von Artgenossen ab. Meist geht es bei Traditionen im Tierreich um Nahrung – was kann man fressen und wo findet man es –, es gibt aber auch außergewöhnliche soziale Konventionen. In Costa Rica hat ein Rudel von Kapuzineraffen die bizarre Gewohnheit, die Finger in die Augen, die Nase oder den Mund eines Artgenossen zu stecken. Die Affen sitzen in dieser Haltung lange zusammen und schaukeln leicht hin und

AUF EINEN BLICK
UNSERE KULTURELLE WIEGE

1 Kultur beschreibt die Fähigkeit von Populationen, traditionelles Wissen an Artgenossen weiterzugeben. Wichtig ist dabei die Nachahmung.

2 Imitation und kulturelle Traditionen gibt es im gesamten Tierreich. Die Grundlage für den Erfolg des Menschen ruht somit bereits in seinen evolutionären Wurzeln.

3 Beim Menschen ist die Gabe, Kenntnisse von anderen zu erwerben und zu verbreiten, einzigartig ausgeprägt. Damit entsteht ein gemeinsamer Wissensschatz, der über Generationen ausgebaut und verbessert wird.


Tradition und Kultur liegen in der Wiege der Menschheit. Hier weist ein Jäger der San in Namibia seine Kinder in die Geheimnisse der Jagd ein.

GETTY IMAGES / KERSTIN GEIER

her – was vermutlich die Stärke der sozialen Bindungen überprüfen soll.

Tiere machen auch »Erfindungen«. Bei diesem Wort denkt man vielleicht an den Buchdruck von Johannes Gutenberg oder ans World Wide Web, dessen Grundlage Tim Berners-Lee entwickelt hat. Tierische Innovationen sind nicht minder faszinierend. Mein Lieblingsbeispiel heißt Mike: Wie die Primatenforscherin Jane Goodall beobachtete, ersann der junge Schimpanse ein lautstarkes Imponiergehabe durch das Gegeneinanderschlagen von zwei leeren Benzinkanistern. Das schüchterte Mikes Rivalen derart ein, dass er in Rekordzeit auf der sozialen Leiter nach oben stieg und zum Alpha-Männchen wurde. Japanische Aaskrähen wiederum erfanden die Methode, Nüsse mit Hilfe von Autos zu knacken. Die Vögel können die harte Schalen von Walnüssen nicht mit ihrem Schnabel öffnen. Stattdessen legen sie die Früchte an einer Kreuzung auf die Straße und lassen Autos darüberfahren. Wenn die Ampel dann auf Rot springt, sammeln sie ihre Beute ein. Und eine Gruppe von Staren, die bekanntermaßen ihre Nester gern mit glänzenden Objekten verzieren, plünderte in einer amerikanischen Kleinstadt mit Vorliebe den Münzautomaten einer Autowaschanlage.

Solche Geschichten sind mehr als nur bezaubernde Anekdoten aus der Natur. Vergleichende Analysen zeigen, dass das soziale Lernen und die Innovationsfähigkeit von Tieren faszinierenden Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Am wichtigsten ist dabei die Erkenntnis, dass innovative und nachahmungsfreudige Arten ein ungewöhnlich großes Gehirn besitzen – sowohl absolut als auch im Verhältnis zur Körpergröße. Der Zusammenhang zwischen Innovationsfähigkeit und Hirngröße wurde ursprünglich bei Vögeln beobachtet, ließ sich später aber auch bei Primaten bestätigen. Diese Befunde stützen die Hypothese des kulturellen Antriebs (cultural drive), die der Biochemiker Allan Wilson (1934–1991) von der University of California in Berkeley in den 1980er Jahren erstmals formuliert hat.

Nach Wilsons Ansicht verschafft die Fähigkeit, Probleme zu lösen oder die Neuerungen anderer nachzuahmen, dem Individuum einen Überlebensvorteil. Da solche Talente eine neurobiologische Grundlage besitzen, wird die natürliche Selektion ein immer größeres Gehirn begünstigen – ein sich selbst verstärkender Prozess, der zu dem gewaltigen Organ führt, dem der Mensch seine grenzenlose Kreativität und Kultur verdankt (siehe »Die Hypothese des kulturellen Antriebs«, S. 16).

Anfangs stieß Wilson mit seiner Argumentation bei anderen Wissenschaftlern auf Skepsis. Wenn Taufliegen mit ihrem winzigen Gehirn bereits bestens zur Nachahmung in der Lage sind, warum sollte die Selektion dann das verhältnismäßig riesige Denkorgan der Primaten hervorbringen? Dieses Rätsel blieb jahrelang ungelöst, bis eine Antwort aus unerwarteter Richtung kam.

Nicht mehr, sondern bessere Nachahmung

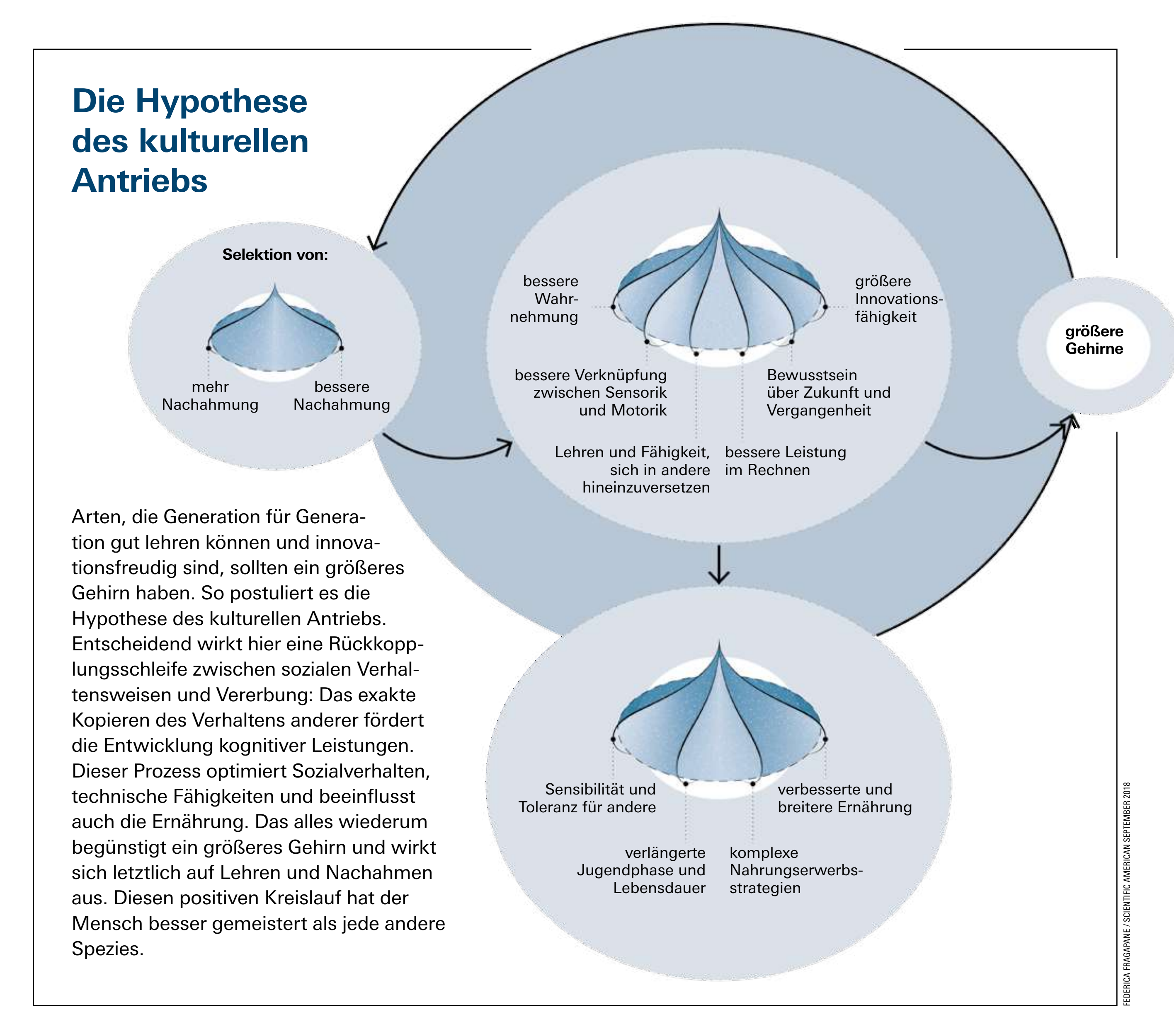
Um den besten Weg zum Lernen in einer komplexen, sich wandelnden Umwelt zu finden, ersannen meine Kollegen und ich 2010 ein Strategiespiel am Computer: In einer hypothetischen Welt konnten so genannte Agenten verschiedenste Verhaltensweisen an den Tag legen, die jeweils einen unterschiedlichen Gewinn einbrachten. Die Aufgabe bestand darin, die besten Handlungen herauszufinden und dann zu verfolgen, wie sich diese veränderten. Die Agenten konnten entweder eine neue Verhaltensweise lernen oder eine zuvor erlernte anwenden, wobei das Lernen durch Ausprobieren oder durch Nachahmen anderer Individuen erfolgte. Der Ausgang dieses Computerturniers war höchst aufschlussreich: Die Leistung korrelierte stark mit dem Grad des sozialen Lernens. In der erfolgreichsten Lösung mussten die Agenten nicht oft lernen, aber wenn sie es taten,

dann fast immer durch Nachahmung, die sie stets präzise und effizient durchführten.

Das Spiel lehrte uns, was hinter der positiven Beziehung zwischen sozialem Lernen und Hirngröße bei Primaten steckt: Die natürliche Selektion begünstigt nicht die Neigung zu immer mehr sozialem Lernen, sondern zu immer besserem. Zum Nachahmen brauchen Tiere kein großes Gehirn, zum guten Nachahmen aber sehr wohl.

Diese Erkenntnis gab den Anlass, die empirischen Grundlagen der Hypothese vom kulturellen Antrieb genauer zu erforschen. Sie lässt erwarten, dass die natürliche Selektion im Primatengehirn anatomische Strukturen oder funktionelle Fertigkeiten fördern sollte, die ein genaues, effizientes Imitieren ermöglichen. Ein Beispiel dafür wäre eine bessere visuelle Wahrnehmung, was die Nachahmung über größere Entfernungen oder die Imitation feinmotorischer Bewegungen ermöglichte. Außerdem sollte die Selektion die Verknüpfungen zwischen sensorischen und motorischen Hirnstrukturen stärken, weil sich dadurch Beobachtungen bei anderen besser in entsprechende Körperbewegungen umsetzen lassen.

Die Hypothese des kulturellen Antriebs sagt auch voraus, dass die Selektion verbesserter sozialer Lernfähigkeit weitere Aspekte des Sozialverhaltens beeinflusst. Dahinter steckt folgende Überlegung: Je größer die Gruppe ist und je mehr Zeit die Individuen in Gesellschaft verbringen, desto öfter ergeben sich Gelegenheiten zum sozialen Lernen. Affen erwerben durch Nachahmung vielfältige Methoden der Nahrungssuche vom Madenpulen aus einer Baumrinde bis zum Termitenangeln mit Stöckchen. Wenn soziales Lernen Primaten ermöglicht, sich schwierige, aber produktive Methoden der Nahrungsbeschaffung anzueignen, sollte jede Spezies, die gut im sozialen Lernen ist, häufiger effektive Methoden der Nahrungssuche und des Werkzeuggebrauchs an den Tag legen. Die Individuen sollten sich vielseitiger ernähren und länger leben, so dass ihnen mehr Zeit bleibt, um neue Fähigkeiten zu erlernen und sie an Nachkommen weiterzugeben. Unter dem Strich sagt die



Arten, die Generation für Generation gut lehren können und innovationsfreudig sind, sollten ein größeres Gehirn haben. So postuliert es die Hypothese des kulturellen Antriebs. Entscheidend wirkt hier eine Rückkopplungsschleife zwischen sozialen Verhaltensweisen und Vererbung: Das exakte Kopieren des Verhaltens anderer fördert die Entwicklung kognitiver Leistungen. Dieser Prozess optimiert Sozialverhalten, technische Fähigkeiten und beeinflusst auch die Ernährung. Das alles wiederum begünstigt ein größeres Gehirn und wirkt sich letztlich auf Lehren und Nachahmen aus. Diesen positiven Kreislauf hat der Mensch besser gemeistert als jede andere Spezies.

FEDERICA FRAGAPANE / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018

Hypothese des kulturellen Antriebs voraus, dass das Ausmaß des sozialen Lernens nicht nur mit der Hirngröße korreliert, sondern auch mit einer Fülle anderer Messgrößen der Kognitionsleistung.

Vergleichende Verhaltensanalysen bestätigen diese Vorhersagen: Dieselben Primatenarten, die sich am meisten durch soziales Lernen und Innovationsfähigkeit auszeichnen, ernähren sich auch am abwechslungsreichsten, benutzen Werkzeuge zur Nahrungssuche und zeigen die kompliziertesten sozialen Verhaltensweisen. Wie statistische Auswertungen offenbarten, variieren diese Fähigkeiten schrittweise, so dass sich die einzelnen Spezies auf einer Achse der allgemeinen Kognitionsleistung einordnen lassen – in Analogie zum Intelligenzquotienten des Menschen sprechen wir hier von Primatenintelligenz.

Schimpansen und Orang-Utans erbringen in all diesen Disziplinen ausgezeichnete Leistungen und weisen demnach eine hohe Primatenintelligenz auf; manche nachtaktiven Halbaffen schneiden dagegen eher schlecht ab. Neurowissenschaftliche Studien untermauern die enge Korrelation der Primatenintelligenz mit Hirngröße und Lernleistung: Im Zuge der Evolution des Primatengehirns entstanden immer größere und besser vernetzte Hirnregionen, die präzise gesteuerte Bewegungen und komplexe Verhaltensweisen ermöglichen (mehr zur Evolution von Primatengehirnen im nächsten Heft).

Trägt man das Maß der Intelligenz in einen Stammbaum ein, so zeigt sich, dass höhere Intelligenz bei vier verschiedenen Primatengruppen unabhängig voneinander entstanden ist: Kapuzineraffen, Makaken, Paviane und Menschenaffen – also genau die für soziales Lernen bekannten Tiere. Das gleiche Muster sollte sich ergeben, wenn kulturelle Prozesse die Evolution von Gehirn und Kognition vorangetrieben haben. Statistische Analysen sowie Stoffwechselmessungen, die den Energieverbrauch des Gehirns bestimmen, bestätigen diese Schlussfolgerung.

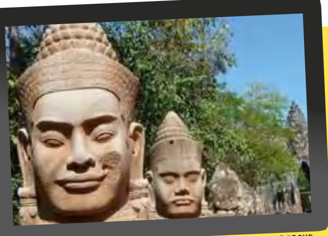
Soziales Lernen erschließt die notwendigen Ressourcen für ein energetisch teures Gehirn

Kultur ist jedoch nicht alles. Eine wichtige Rolle für die Evolution des Primatengehirns spielen auch Ernährung und Sozialverhalten – zeichnen sich doch Affen, die Früchte fressen oder in großen, komplexen Gruppen leben, durch ein großes Gehirn aus. Vermutlich entstanden hohe Intelligenz und eine längere Lebensdauer bei manchen Primaten koevolutiv. Ihre kulturellen Fähigkeiten versetzten sie dann in die Lage, hochwertige, aber schwierig zu erlangende Nahrungsressourcen zu nutzen, deren Nährstoffe wiederum das Hirnwachstum förderten. Das Gehirn stellt ein energetisch teures Organ dar; nur durch soziales Lernen kommen die Tiere an die notwendigen Ressourcen für Wachstum und Instandhaltung eines großen Denkapparats.

Warum aber besitzen andere Primaten dann nicht wie wir eine komplexe Kultur? Warum haben Schimpansen weder Genome sequenziert noch Weltraumraketen gebaut? Das Geheimnis liegt in der Genauigkeit der Informationsweitergabe von einem Individuum zum anderen, also in der Originaltreue, mit der erlernte Information vom Sender zum Empfänger übergeht. Ohne exakte Weitergabe wird eine kumulative Kultur, die auf der Addition von Kenntnissen basiert, unmöglich. Ist hier jedoch eine bestimmte Präzision erreicht, nehmen sowohl die Größe des kulturellen Repertoires einer Spezies als auch die Lebensdauer kultureller Merkmale in einer Population mit weiterer Übertragungsgenauigkeit exponentiell zu. Ein bescheidenes Maß von Neuerfindung und Verfeinerung führt dann sehr schnell zu umfangreichen kulturellen Veränderungen. Und die einzige heute lebende Spezies, die diese Schwelle überwunden hat, ist der Mensch.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit**



FRAUKE FOCKE

Die originalgetreue Weitergabe bewerkstelligten unsere Vorfahren durch Lehren, also durch Verhaltensweisen, die dazu dienen, dem Schüler das Lernen zu erleichtern. In der Natur kommt Nachahmung weit verbreitet vor, Lehren dagegen selten. Aber in menschlichen Gesellschaften ist es allgegenwärtig, wenn man seine vielfältigen subtilen Formen mit berücksichtigt. Wie mathematische Analysen offenbarten, kann sich Lehren in der Evolution nur unter rauen Bedingungen entwickeln, aber eine kumulative Kultur vermag solche Voraussetzungen zu mildern. Lehren und kumulative Kultur entwickelten sich bei unseren Vorfahren parallel. Damit tauchte in der Geschichte unseres Planeten zum ersten Mal eine Spezies auf, deren Mitglieder ihren Artgenossen ein breites Spektrum verschiedener Fähigkeiten beibringen konnten, was wiederum durch kognitives Handeln gefestigt wurde (siehe »Schlaue Köpfe«, S. 20).

Die kulturellen Kenntnisse wie Nahrungssuche, Werkzeugherstellung oder erlernte Rufe, die Homininen (die biologische Gruppe des Menschen sowie seiner ausgestorbenen engen Verwandten) sich gegenseitig beibrachten, schufen den Rahmen für die Entstehung von Sprache. Warum sich diese Art der Kommunikation ausschließlich bei unseren Vorfahren entwickelte, gehört zu den großen ungelösten Fragen. Eine Erklärung wäre, dass sich mit ihr der Aufwand des Lehrens verringert, während seine Genauigkeit zunimmt und sein Anwendungsbereich sich erweitert. Die menschliche Sprache dürfte zumindest unter den heute lebenden Spezies einzigartig sein, denn nur der Mensch baute eine derart vielgestaltige, dynamische Kultur auf, die der Rede wert ist. Diese Vorstellung erklärt die vielen charakteristischen Eigenschaften der Sprache, wie ihre Eindeutigkeit, ihre Fähigkeit zur Verallgemeinerung und die Tatsache, dass sie erlernt wird (siehe dazu auch Teil 3 der Serie im Märzheft).

Anfangs war Sprache nicht mehr als eine Hand voll gemeinsam genutzter Symbole. Die Verwendung dieser Protosprache stellte jedoch einen Selektionsdruck dar, der



ALAMY / STEVE BLOOM

Manche Schimpansen angeln mit Stöckchen nach Termiten; die Jungtiere lernen diese Tradition des Werkzeuggebrauchs durch Nachahmen. Doch nur der Mensch schuf durch Kooperation eine hoch entwickelte Technologie.

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, A CLEAR REFLECTION ON WEBB TELESCOPE'S SECONDARY MIRROR, FOTO: NASA/CHRIS GUNN (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/GSFC/8169557139) / CC BY 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE)

einerseits die Sprachlernfähigkeit des Homininengehirns förderte und andererseits bei den Sprachen leicht zu erlernende Strukturen bevorteilte. Dass die kulturelle Tätigkeit unserer Vorfahren für eine Selektion auf körperlicher und geistiger Ebene sorgte – bekannt als Koevolution von Genen und Kultur –, gilt heute als gut belegt. Theoretische, anthropologische und genetische Analysen machten deutlich, wie sozial weitergegebene Fertigkeiten, darunter Werkzeugherstellung und -gebrauch, in einen natürlichen Selektionsdruck mündeten, der Anatomie und Kognition des Menschen veränderte. Diese evolutionäre Rückkopplungsschleife prägte die Entstehung des modernen menschlichen Geistes und trieb die Entwicklung psychischer Eigenschaften voran, die Individuen dazu brachten, zu lehren, zu sprechen und nachzuahmen sowie Ziele und Absichten mit anderen zu teilen. Auch die Lern- und Rechenleistungen wurden dadurch gefördert. Diese Fähigkeiten entwickelten sich zusammen mit der kumulativen Kultur und verbesserten die Genauigkeit der Informationsweitergabe.

Lehre und Sprache stellten für die Evolution unserer Abstammungslinie einen Wendepunkt dar. Wie sich aus

theoretischen und experimentellen Daten ablesen lässt, schuf unsere einzigartige Fähigkeit zum sozialen Lernen und Lehren die Voraussetzungen für eine umfangreiche Kooperation. Die Kultur führte die Menschheit auf neue Wege, weil sie einerseits die auch bei anderen Tieren erkennbaren Kooperationsmechanismen wie gegenseitige Hilfeleistung unterstützte, andererseits neue Formen hervorbrachte. Die kulturelle Gruppenselektion, bei der eine Gruppe untereinander kooperiert, mit anderen aber konkurriert, breitete sich aus – und mündete etwa in Bewässerungssystemen oder Armeen (mehr dazu in Teil 5 und 6 der Serie im Mai- und Juniheft).

Vom Jäger und Sammler zum Bauern

Durch die Kultur konnten unserer Vorfahren besser Nahrung beschaffen und überleben. Mit jeder neuen Erfindung gelang es der betreffenden Bevölkerungsgruppe, ihre Umwelt effizienter zu nutzen. Dadurch wuchsen nicht nur die Gehirne, sondern auch die Populationen. Durch die Domestikation von Pflanzen und Tieren nahm sowohl die Bevölkerungszahl als auch die gesellschaftliche Komplexität zu. Die Landwirtschaft befreite die Gesellschaften von den Einschränkungen des Nomadenlebens der Jäger und Sammler. Die Bauerngesellschaften gediehen, weil die Lebensmittelproduktivität zunahm und weil die Landwirtschaft eine Reihe weiterer Innovationen auslöste, durch die sich die menschliche Gesellschaft dramatisch veränderte. In den größeren Gemeinschaften, die durch wachsende landwirtschaftliche Erträge möglich wurden, breiteten sich nützliche Neuerungen schneller aus und wurden eher beibehalten. Ackerbau und Viehzucht lösten die neolithische Revolution aus – nicht nur auf Grund ihrer technischen Errungenschaften wie Pflug und Bewässerung, sondern auch, weil sie vollkommen unvorhersehbare Entwicklungen in Gang setzte, wie die Erfindung des Rads oder die Entstehung von Stadtstaaten und Religionen.

In dem sich herauskristallisierenden Bild von der kognitiven Evolution des Menschen erscheinen wir als hausgemachte Lebewesen. Die charakteristischen Merkmale des Menschseins – Intelligenz, Kreativität und Sprache, aber auch unser ökologischer und demografischer Erfolg – entstanden entweder direkt als evolutionäre Anpassungen an die kulturellen Tätigkeiten unserer Vorfahren oder als deren unmittelbare Folgen. Für die Evolution unserer Spezies erweist sich offenbar die kulturelle Vererbung als mindestens ebenso wichtig wie die genetische.

Evolution durch natürliche Selektion gilt im Allgemeinen als Prozess, bei dem Veränderungen der äußeren Umwelt, etwa durch Fressfeinde, Klima oder Krankheiten, Eigenschaften eines Organismus verbessern. Aber so einfach hat sich der menschliche Geist nicht entwickelt. Unsere mentalen Fähigkeiten entstanden vielmehr durch verwickelte Rückkopplungsmechanismen, in deren Verlauf sich unsere Vorfahren ständig Nischen schufen, die in einem endlosen Kreislauf einen Selektionsdruck auf Körper und Geist ausübten. Wie bei einer sich selbst erhaltenden chemischen Reaktion trieb dieser unaufhaltsame Prozess die Kognition und Kultur des Menschen voran und forcierte so seine Abspaltung von anderen Primaten. ◂

Ein Besuch von Außerirdischen

Angenommen, eine außerirdische Intelligenz studierte die Biosphäre der Erde. Welche Spezies würde sie für etwas Besonderes halten? Die Antwort: den Menschen. Hier einige Gründe:

Bevölkerungszahl: Die Zahl der Menschen liegt um mehrere Zehnerpotenzen höher, als man es für Säugetiere unserer Größe erwarten dürfte.

Verbreitungsgebiet: Menschen haben praktisch alle Landflächen der Erde besiedelt.

Umwelteinfluss: Menschen kontrollieren in beispiellosem Umfang riesige, vielfältige Energie- und Materieströme.

Globale Auswirkungen: Menschliche Aktivitäten bedrohen unzählige Arten und lösen in der gesamten Biosphäre einen starken evolutionären Wandel aus.

Kognition, Kommunikation und Intelligenz: In Lern- und Kognitionstests zeigen Menschen überragende Leistungen; die menschliche Sprache erweist sich im Gegensatz zur Kommunikation anderer Arten als äußerst flexibel.

Erkenntnisgewinn: Menschen erwerben, teilen und speichern Informationen in nie dagewesenem Umfang und bauen von Generation zu Generation auf dem gemeinsamen kulturellen Wissen auf.

Technologie: Menschen erfinden unendlich komplexere und vielfältigere Produkte als andere Tiere und stellen sie in Massenproduktion her.

Die Außerirdischen mögen vielleicht den Elefantenrüssel anmutig und den Giraffenhals beeindruckend finden, aber das wirklich Einzigartige wäre für sie – der Mensch!

QUELLEN

Dean, L.G. et al.: Identification of the Social and Cognitive Processes Underlying Human Cumulative Culture. In: Science 335, S. 1114–1118, 2012

Laland, K.N.: Darwin's Unfinished Symphony. How Culture Made the Human Mind. Princeton University Press, Princeton 2017

Reader, S.M., Laland, K.N.: Social Intelligence, Innovation, and Enhanced Brain Size in Primates: In: PNAS 99, S. 4436–4441, 2002

Rendell, L. et al.: Why Copy Others? Insights from the Social Learning Strategies Tournament. In: Science 328, S. 208–213, 2010

KOGNITION

SCHLAUE KÖPFE

Zwei entscheidende Merkmale begründen die Sonderstellung des Menschen: Er kann im Geist komplexe Szenarien entwickeln und diese mit anderen austauschen.



Thomas Suddendorf ist Professor für Psychologie an der University of Queensland in Australien. Der gebürtige Deutsche erforscht die Entwicklung geistiger Fähigkeiten bei Kleinkindern und nichtmenschlichen Primaten, um so grundlegende Fragen nach dem Wesen und der Evolution des menschlichen Geistes zu beantworten.

spektrum.de/artikel/1609500



Warum halten Menschen im Zoo Gorillas und nicht umgekehrt? Während andere Primaten sich mit schrumpfenden Lebensräumen begnügen müssen, haben wir den unseren erstaunlich ausgeweitet und verändert. Unsere dominierende Stellung beruht wohl kaum auf körperlichen Fähigkeiten: Andere Tiere sind stärker, schneller und mit schärferen Sinnesorganen ausgestattet. Der Schlüssel liegt in unseren geistigen Eigenschaften. Aber herauszufinden, welche kognitiven Merkmale den Menschen zu etwas Besonderem machen, hat sich als außerordentlich verzwickt erwiesen – und zudem scheinen immer wieder neue Studien zu belegen, dass zahlreiche Tiere von Vögeln bis zu Schimpansen uns kognitiv kaum nachstehen.

Um nur ein Beispiel zu nennen: 2017 stellten zwei schwedische Wissenschaftler die kühne These auf, Raben könnten genau wie Menschen die Zukunft planen. Fünf Vögel lernten, einen Stein aufzuheben und in eine Schachtel fallen zu lassen, um sich so eine Belohnung zu verdienen. Später wählten die Tiere den Stein unter mehreren Gegenständen aus – und zwar schon Minuten bis Stunden bevor sie mit der Schachtel konfrontiert wurden. Eine ähnliche Aufgabe mit Flaschenverschlüssen als Tauschware meisterten die Raben ebenfalls. Die Forscher schlossen daraus, die Vögel könnten tatsächlich flexibel »vorausdenken«.

Allerdings lässt sich die Leistung der Raben und die bei anderen Studien beobachteten kognitiven Fähigkeiten etwa von Menschenaffen auch einfacher erklären. Es hat sich herausgestellt, dass sich die Kognition von Mensch und Tier zwar in vielen Aspekten ähnelt, in zweierlei Hinsicht aber tief greifend unterscheidet: Erstens können wir uns dank unserer unbändigen Imaginationskraft auf einer geistigen Bühne viele mögliche Situationen ausmalen und mental verschiedene Folgen durchspielen. Und zweitens haben wir den Drang, unsere Gedanken mit anderen auszutauschen. Diese beiden neu hinzugekommenen Merkmale gestalteten gemeinsam den menschlichen Geist.

Wirft man einen etwas genaueren Blick auf das Experiment mit den Raben, fällt etwas auf: Schon vor dem Test hatten die Vögel bei mehreren Durchläufen gelernt, dass der Gegenstand, um den es ging – der Stein – eine Belohnung nach sich zog, die alternativen Objekte dagegen nicht. Deshalb ist es eigentlich nicht verwunderlich, dass sie sich für das zuvor bereits verstärkte Verhalten entschieden, als der eigentliche Versuch begann.

Das zeigt: Bevor Wissenschaftler weit reichende Fähigkeiten von Tieren postulieren, gilt es, schlanke Deutungen sorgfältig auszuschließen. Außerdem müssen die Resultate des Experiments unabhängig voneinander reproduzierbar sein. Um Überinterpretationen von Kognitionsleistungen zu vermeiden, stellten wir in einer 2011 veröffentlichten Studie Kindern bei jedem Experiment jeweils eine neue Aufgabe; sie konnten also nicht durch Wiederholung lernen. Außerdem variierten wir die Tests zeitlich und räumlich, um den jungen Probanden keine Lösungshinweise zu geben. Und wir konfrontierten sie mit Problemstellungen, bei denen unterschiedliche Lösungsstrategien gefordert waren, so dass angeborene Verhaltensweisen ausgeschlossen werden konnten.

Wir zeigten den Kleinen beispielsweise einen Kasten, der sich durch trickreiche Hebelvorrichtungen öffnen ließ, und brachten sie dann in einen anderen Raum, wo sie durch andere Aufgaben abgelenkt wurden. Nach 15 Minuten durften sie sich einen von mehreren neuen Gegenständen aussuchen und damit zurück ins erste Zimmer gehen. Dreijährige griffen wahllos zu – die Vierjährigen aber wählten in der Regel das Objekt, das sie später beim Öffnen der zuvor präsentierten Kiste nutzen konnten.

Die hoch entwickelte Gabe, sich auch eine unangenehme Zukunft auszumalen

Ähnlich kann man die Fähigkeit zum absichtlichen Üben testen, also zum Erproben von Handlungen, mit denen sich zukünftige Leistungen verbessern lassen. Beispielsweise durften Kinder trainieren, einen an einer Schnur befestigten Ball mit einer Tasse zu fangen, bevor sie sich bei einer ähnlichen Aufgabe beweisen mussten und für Erfolg belohnt wurden. Dabei zeigte sich, dass Probanden ab vier bis fünf Jahren ihr eigenes zukünftiges Können gezielt beeinflussen – sie üben –, jüngere Kinder aber nicht.

Solche Experimente zielen darauf, grundlegende Fähigkeiten aufzuspüren; sie sagen aber nichts über deren Obergrenzen aus. So meisterte mein vierjähriger Sohn eine entsprechende Aufgabe ebenfalls. Doch als wir später zu Hause auf dem Bett saßen, legte er seine Hand auf mein Bein und sagte: »Papa, ich will nicht, dass du stirbst.« Als ich ihn erstaunt fragte, wie er denn darauf käme, antwortete er, er werde doch erwachsen werden, Kinder haben, und dann würde ich Großvater werden und müsste schließlich auch sterben. Damit bewies er eine erstaunlich hoch entwickelte Gabe, sich die Zukunft auszumalen und zu dieser existenziell bedrohlichen Erkenntnis zu gelangen. Unser Experiment hatte dagegen nur allgemein die Fähigkeit zur Voraussicht offenbart.

Tierstudien konnten Voraussicht oder absichtliches Üben nach strengen Kriterien bisher nicht nachweisen. Lässt sich daraus schließen, dass Tieren diese Gaben fehlen? Das wäre voreilig. Die Abwesenheit eines Beweises ist kein Abwesenheitsbeweis, heißt es. Bei Tieren ist es schwierig, kognitive Fähigkeiten nachzuweisen – noch schwieriger ist aber, das Fehlen dieser Fähigkeiten zu belegen.

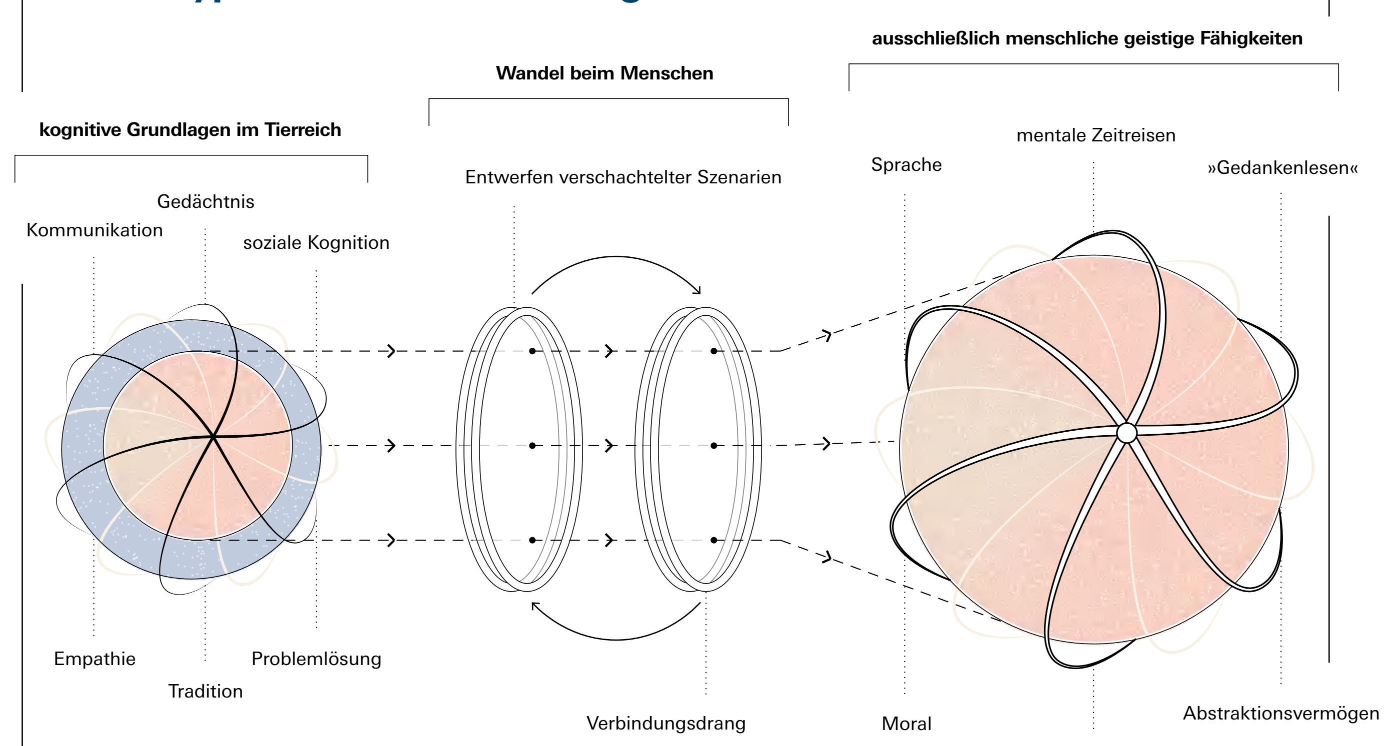
AUF EINEN BLICK
FANTASIE UND DIALOG

1 Tiere sind zu erstaunlichen kognitiven Fähigkeiten in der Lage. Darin unterscheiden sie sich vom Menschen nur graduell.

2 Zwei Merkmale gibt es aber nur bei *Homo sapiens*: das Entwerfen verschachtelter Szenarien sowie der Gedankenaustausch mit Artgenossen.

3 Gemeinsam bilden diese beiden Eigenschaften die Grundlage für menschliche Leistungen wie Sprache, Kultur, Moral und Voraussicht.

Zwei typisch menschliche Eigenschaften



Wie vergleichende psychologische Studien offenbarten, teilen Mensch und Tier verschiedene kognitive Fähigkeiten. Aber erst zwei ausschließlich menschliche Eigenschaften schufen aus diesen Begabungen unsere geistigen Fähigkeiten, mit denen wir uns vom Tierreich abgrenzen: Mit dem Entwerfen verschachtelter Szenarien können wir uns mehrere Situationsalternativen ausmalen und in größere Zusammenhänge setzen. Unser Verbindungsdrang, also das menschliche Bedürfnis, Gedanken mit anderen auszutauschen, ermöglicht Leistungen, die über die Fähigkeiten eines Einzelnen hinausgehen. Beide Merkmale verstärken sich gegenseitig und veränderten unseren Geist. Hieraus resultierten Sprache, mentale Zeitreisen, Moral, Kultur, Abstraktionsvermögen sowie »Gedankenlesen«, also das Hineinversetzen in andere.

Eine Studie, die mein Kollege Jonathan Redshaw zusammen mit mir 2016 durchführte, zielte auf einen der grundsätzlichsten Aspekte des Nachsinnens über die Zukunft: Die Erkenntnis, sie ist unsicher. Wird man sich dessen bewusst, erscheint es sinnvoll, sich auf verschiedene Möglichkeiten vorzubereiten und Alternativpläne zu schmieden. Jäger tun das, indem sie Fallen auf allen möglichen Fluchtrouten ihrer Beute aufstellen und nicht nur auf einer.

Wir konfrontierten Schimpansen und Orang-Utans mit einem senkrecht stehenden Rohr, in das von oben eine Belohnung fiel, welche die Affen unten auffangen sollten. Einer Gruppe von Kindern im Alter zwischen zwei und vier Jahren stellten wir die gleiche Aufgabe. Beide Gruppen konnten ohne Weiteres vorhersehen, dass die Belohnung unten wieder auftauchen würde, und entsprechend hielten sie die Hände unter die Öffnung, um sich auf das Fangen vorzubereiten.

Dann erschwerten wir den Ablauf: An Stelle des geraden Rohrs trat ein auf dem Kopf stehendes Y-förmiges Rohr mit zwei Ausgängen. Sowohl die Affen als auch zweijährige Kinder hielten jetzt ihre Hände nur unter eine der beiden Öffnungen und ergatterten somit lediglich in der Hälfte aller Versuche eine Belohnung. Vierjährige dagegen hielten die Hände sofort und immer wieder unter beide Öffnungen – sie waren demnach in der Lage, sich auf zwei einander ausschließende Versionen eines bevorstehenden Ereignisses vorzubereiten (siehe Fotos S. 24). Im Alter zwischen zwei und vier Jahren trat diese Planung für beide Eventualitäten immer häufiger auf; bei den Affen war dies nie zu beobachten.

Wieder beweist das Experiment nicht, dass Menschenaffen und zweijährige Kinder keine Vorstellung von alternativen Zukunftsereignissen haben. Vielleicht waren die Tiere unmotiviert, vielleicht verstanden sie die Aufgabe grundsätzlich nicht, oder sie konnten ihre beiden Hände nicht richtig koordinieren. Vielleicht hatten wir auch einfach die falschen Individuen erwischt, und kompetentere Tiere würden die Aufgabe bewältigen.





Ein Kind hält spontan beide Hände unter die Öffnungen eines Rohrs, aus denen ein Ball fallen kann. Dem Schimpansen fehlt diese Voraussicht: Er nimmt nur eine Hand.

Um wirklich zu belegen, dass die Fähigkeit fehlt, müsste ein Wissenschaftler alle Tiere zu allen Zeiten testen. Das ist natürlich nicht praktikabel. Wir können nichts anderes tun, als einigen Individuen die Chance zu geben, ihr Talent unter Beweis zu stellen. Scheitern sie dabei immer wieder, untermauert das die Annahme, dass sie die fragliche Fähigkeit tatsächlich nicht besitzen – aber auch dann könnten zukünftige Studien das widerlegen. Wegen der Unsicherheiten beim Interpretieren von Tierverhalten sowie dem grundsätzlichen Problem, das Fehlen einer Fähigkeit generell zu beweisen, lässt sich nur schwer ausmachen, was den Menschen auszeichnet.

Schwierig heißt aber nicht unmöglich. In meinem Buch »Der Unterschied« gebe ich einen Überblick über die Beweislage für die kognitiven Fähigkeiten, die am häufigsten als einzigartig menschlich angesehen werden, und es zeigte sich, dass Tiere doch klüger sind, als man allgemein annimmt. So können Schimpansen Probleme durch Einsicht lösen, sie trösten Artgenossen, die Kummer haben, und sie pflegen soziale Traditionen. Dennoch gibt es Aspekte von Sprache, Voraussicht, Intelligenz, Kultur und Moral des Menschen, die etwas Besonderes darstellen – genauso wie von der Gabe, sich die Gedanken eines anderen vorzustellen, also sich in jemanden hineinzuversetzen. In jeder dieser Domänen stieß ich auf zwei grundsätzliche Merkmale, die als entscheidende Unterschiede zwischen Mensch und Tier herausragen: Das eine ist das Entwerfen verschachtelter Szenarien, wie ich es nenne, also unser Talent, Situationsalternativen zu entwickeln, darüber nachzudenken und sie in größere Zusammenhänge zu integrieren. Als Zweites kommt der Verbindungsdrang hinzu, unser tief sitzendes Bedürfnis, Gedanken mit anderen auszutauschen, so dass wir gemeinsam etwas Neues schaffen, was ein Individuum allein nicht kann (siehe »Zwei typisch menschliche Eigenschaften«, S. 23).

Auf der inneren Bühne

Durch das Entwerfen verschachtelter Szenarien können wir uns die Situation anderer Menschen, moralische Dilemmata oder vollkommen fiktive Geschichten ausmalen. Vorausdenken versetzt uns in die Lage, uns potenzielle zukünftige Ereignisse vor Augen zu führen, über Alternativen nachzudenken und diese in umfassendere Handlungsstränge zu setzen. Das wiederum schafft die Möglichkeit, zu planen und uns auf Gelegenheiten oder Gefahren vorzubereiten, bevor sie Wirklichkeit werden.

Andere Tiere und sogar Bakterien haben sich auf langfristig vorhersehbare Ereignisse wie den Tag-Nacht-Rhythmus eingestellt, und viele können sich auch an lokale Regelmäßigkeiten anpassen. Mittels assoziativem Lernen vermögen Tiere vorherzusehen, dass auf ein bestimmtes Ereignis eine Belohnung oder eine Bestrafung folgt. Aber nur der Mensch ist in der Lage, sich Situationen und sogar vollkommen neue Szenarien mental und ohne äußeren Anlass vorzustellen, indem er Grundelemente wie Personen, Handlungen und Objekte im Geist immer wieder neu kombiniert, um aus solchen mentalen Übungen rationale Schlüsse zu ziehen. Ein einfaches Beispiel: Wenn wir uns ausmalen, wir spielten auf einer belebten Straße Blindekuh, wird uns schnell klar, dass das eine gefährliche Idee ist – auch wenn wir das nie zuvor gemacht haben. Das Entwerfen verschachtelter Szenarien setzt eine Reihe hoch entwickelter, kombinierter Fähigkeiten voraus, darunter Fantasie, Gedächtnis, Reflexionsvermögen und exekutive Entscheidungsfindung.

Das Schaffen verschachtelter Szenarien gleicht einem inneren Theater: Auf einer »Bühne« kreieren wir fiktive Ereignisse, bei denen »Schauspieler« mit »Requisiten« agieren. Nach Art eines »Regisseurs« können wir die Szenen beurteilen und koordinieren; ein »Produzent« entscheidet dann, welches Szenario wir weiterverfolgen. Diese Komponenten sind in verschiedenen psychologischen Konstrukten angesiedelt, wie im Arbeitsgedächtnis, im rekursiven Denken und in den exekutiven Funktionen – Eigenschaften, die sich während der Kindheit unterschiedlich schnell entwickeln. So bildet sich die Fähigkeit zur Voraussicht nur langsam heraus. Selbst als Erwachsene schätzen wir zukünftige Situationen häufig falsch ein – mir jedenfalls passiert das oft. Wir sind eben keine Hellseher.

Da das Entwerfen verschachtelter Szenarien demnach unsicher ist, brauchen wir die zweite typisch menschliche Eigenschaft: die geistige Verbindung mit anderen. Der Psychologe Michael Tomasello bezeichnet diese Gabe als geteilte Intentionalität (siehe Teil 5 der Serie im Maiheft). Um etwas über die Zukunft herauszufinden, ist es schließlich am besten, jemanden zu fragen, der das Entsprechende bereits erlebt hat. Wenn wir wissen wollen, wie ein Urlaub in Neuseeland ist oder was man alles braucht, um Psychologe zu werden, können wir uns beliebig viele Szenarien ausmalen – aber schlauer wäre es, sich den Rat von jemanden zu holen, der schon in dem Land war oder das Fach studiert hat.

Die menschliche Sprache eignet sich ideal für einen solchen Austausch; in den meisten Fällen drehen sich

unsere Gespräche um zeitlich versetzte Ereignisse. Auf diese Weise können wir aus den Erfahrungen, Überlegungen und Plänen anderer lernen. Wir stellen Fragen, geben Ratschläge und bauen dabei tief greifende Verbindungen auf. Und das ist noch nicht alles: Wir können auch die Zukunft gezielter beeinflussen, wenn wir unsere Aktionen koordinieren und gemeinsame Ziele verfolgen. Deshalb kommentieren wir häufig die Strategien eines Mitmenschen, begutachten seinen Fortschritt und unterstützen ihn dann im nächsten Schritt.

Bei genauerem Hinschauen wird klar, dass die außergewöhnlichen menschlichen Fähigkeiten zum größten Teil auf kollektiver Klugheit beruhen. Wir alle profitieren von Hilfsmitteln und Techniken, die andere Menschen erfunden haben. Auch viele Tiere verwenden Werkzeuge, und manche stellen sie sogar her, aber um daraus eine echte Innovation zu schaffen, bedarf es der Erkenntnis, dass sie auch in Zukunft nützlich sein könnten. Erst dann hat man einen Grund, das Werkzeug zu behalten, zu verfeinern und an andere weiterzugeben.

Unsere Vorfahren übten schon vor mehr als einer Million Jahren

Eine solche Entwicklung spiegelt sich auch bei einer typisch menschlichen Fertigkeit wider: dem Bau von Distanzwaffen. Für unsere Vorfahren, die sich ihre Umwelt mit gefährlichen Säbelzahnkatzen teilen mussten, war dies wohl überlebenswichtig. Anfangs warfen unsere Altvorderen vielleicht Steine, um Raubtiere zu vertreiben, aber irgendwann lernten sie, sich mit Speeren zu bewaffnen; später erfanden sie Speerschleudern, dann Pfeil und Bogen. Neue Werkzeuge erweisen sich aber nur dann als vorteilhaft, wenn wir sie wirksam einsetzen können – womit wir wieder beim gezielten Üben angelangt sind. Zwar stellen Schimpansen im Senegal einfache Speere her, mit denen sie in Baumhöhlen sitzende Buschbabys töten. Es wurde aber nie beobachtet, dass sie das Erstechen üben, vom Werfen ganz zu schweigen. Und wenn wir ihnen eine Speerschleuder in die Hand gäben, könnten sie damit gar nichts anfangen.

Die ersten Hinweise auf gezieltes Üben reichen mehr als eine Million Jahre zurück. Die rund 1,8 Millionen Jahre alten Steinwerkzeuge des *Homo erectus* aus dem Acheuléen lassen bereits auf eine erstaunliche Fähigkeit zur Voraussicht schließen, denn sie wurden offensichtlich zur mehrfachen Verwendung von einem Ort zum anderen getragen. Die Herstellung dieser Werkzeuge setzt beträchtliche Kenntnisse über Steine und ihre Bearbeitung voraus. An manchen Fundstätten, so in Olorgesailie in Kenia, ist der Boden noch immer mit bearbeiteten Steinen übersät. Damit stellt sich die Frage, warum unsere Vorfahren weitere Werkzeuge herstellten, wo diese doch bereits in ausreichender Zahl herumlagen. Die Antwort: Wahrscheinlich übten sie, wie man solche Geräte herstellt. Nachdem sie darin versiert waren, konnten sie weiterwandern; wussten sie doch, dass sie ein neues Werkzeug herstellen konnten, sobald ein altes zerbrach. Diese Frühmenschen waren somit nicht nur bewaffnet, sondern auch zum Nachladen bereit.

Die meisten Tierarten lassen sich als Spezialisten oder Generalisten klassifizieren, aber Menschen sind beides: Indem wir uns entsprechende Kenntnisse aneignen, können wir uns schnell an die Anforderungen der jeweiligen Umwelt anpassen – selbst an Begebenheiten, die wir uns nur in unserer Fantasie ausmalen. Durch Kooperation und Arbeitsteilung profitieren wir zusätzlich von einander ergänzenden Fähigkeiten, wodurch wir die Vorherrschaft in höchst vielfältigen Lebensräumen übernommen haben. In unseren Zoos können wir die wildesten Raubtiere halten, weil wir vorhersehen, was sie brauchen, wozu sie in der Lage sind und wozu nicht. Bisher gibt es keine Belege dafür, dass andere Spezies solch mentale Zeitreisen unternehmen oder sich verschwören, um bei nächstbietender Gelegenheit gemeinsam aus dem Zoo auszubrechen.

Mit dem Entwerfen verschachtelter Szenarien und dem Bedürfnis nach geistiger Vernetzung schufen unsere Vorfahren die Grundlage für Zivilisation und Technik, die das Antlitz der Erde veränderten. Wissenschaft ist die disziplinierte Anwendung unserer kollektiven Klugheit, mit der wir den Ursprung unseres Platzes in der Natur besser verstehen. Sie bietet uns die Möglichkeit, die Zukunft systematisch und immer genauer abzubilden. Indem wir die Konsequenzen unserer Handlungen vorhersehen, werden wir auch mit moralischen Entscheidungen konfrontiert. Wir können voraussagen, welche Folgen fortgesetzte Umweltverschmutzung oder die Zerstörung von Lebensräumen nach sich ziehen werden, andere darüber in Kenntnis setzen und – wie das Pariser Klimaabkommen zeigt – global koordinierte Schutzmaßnahmen aushandeln.

Nichts davon gilt als Entschuldigung für Arroganz. Vielmehr resultiert hieraus eine Aufforderung zu Sorgfalt. Wir sind auf diesem Planeten die einzigen Lebewesen, die solche Fähigkeiten besitzen und sollten entsprechend damit umgehen – so wie der Superheld im Comic »Spider-Man«, den sein Onkel Ben ermahnt: »Aus großer Kraft folgt große Verantwortung.« ◂

LITERATURTIPP

Suddendorf, T.: Der Unterschied. Was den Mensch zum Menschen macht. Berlin Verlag, Berlin 2014
Der Autor erklärt unsere Sonderstellung im Detail.

QUELLEN

Kabadayi, C., Osvath, M.: Ravens Parallel Great Apes in Flexible Planning for Tool-Use and Bartering. In: Science 357, S. 202–204, 2017

Redshaw, J., Suddendorf, T.: Children's and Apes' Preparatory Responses to Two Mutually Exclusive Possibilities. In: Current Biology 26, S. 1758–1762, 2016

Redshaw, J. et al.: Flexible Planning in Ravens? In: Trends in Cognitive Sciences 21, S. 821–822, 2017

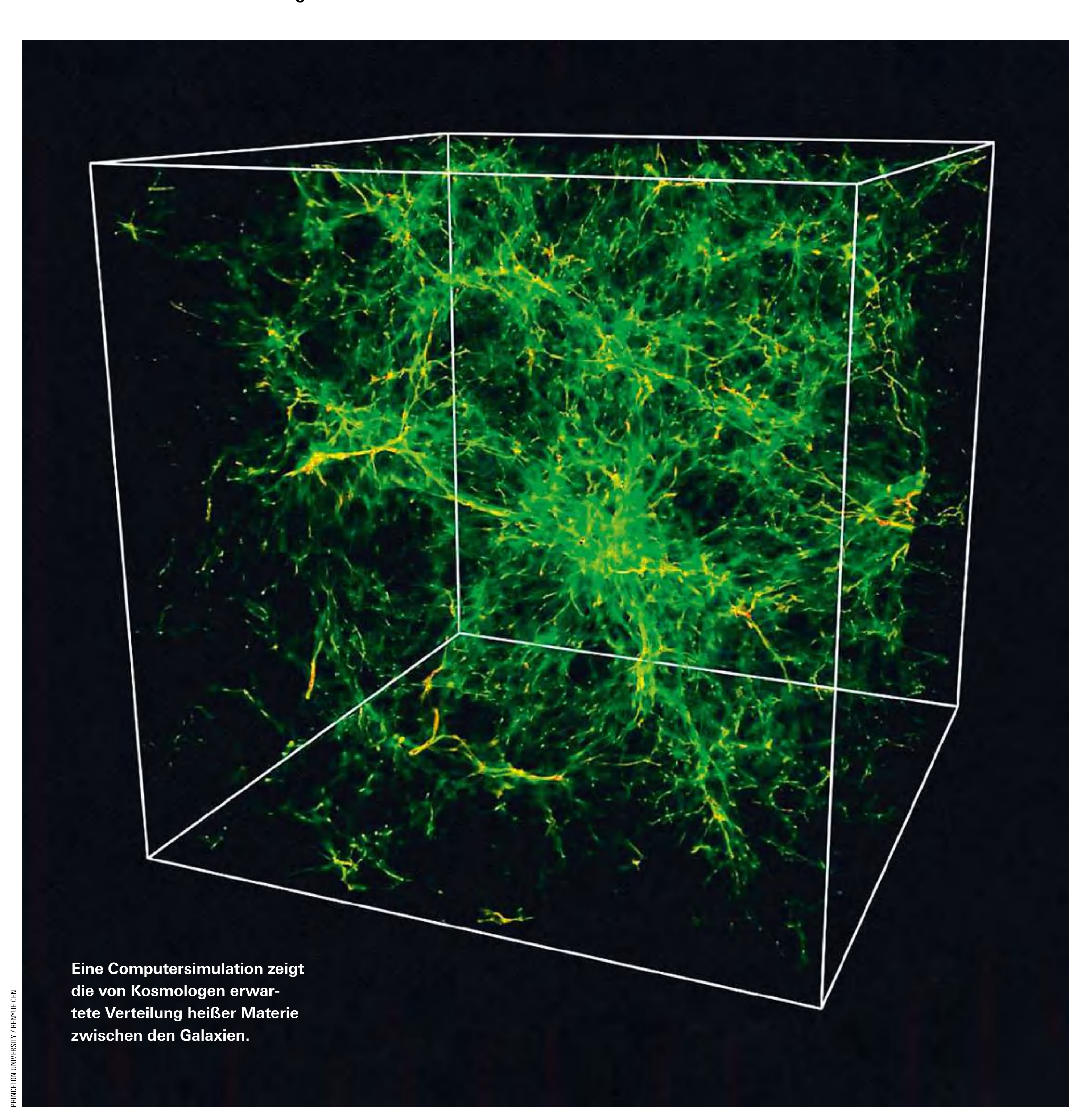
Suddendorf, T. et al.: Children's Capacity to Remember a Novel Problem and to Secure Its Future Solution. In: Developmental Science 14, S. 26–33, 2011

Suddendorf, T. et al: Prospection and Natural Selection. In: Current Opinion in Behavioral Sciences 24, S. 26–31, 2018

KOSMOLOGIE

VERMISSTE MATERIE GEFUNDEN

Lange wussten Astronomen nicht, wo wesentliche Teile der gewöhnlichen Materie im Universum stecken. Nun haben zwei verschiedene Methoden die Atome im Raum zwischen den Galaxien sichtbar gemacht.



Eine Computersimulation zeigt die von Kosmologen erwartete Verteilung heißer Materie zwischen den Galaxien.

PRINCETON UNIVERSITY / RENYUE CEN

Wissenschaftler inventarisierten Mitte der 1990er Jahre die sichtbare Materie im Kosmos – Sterne, Planeten und Gas; also alles, was aus Atomen besteht. Auf der Grundlage theoretischer Untersuchungen zu der Frage, wie mit dem Urknall Materie entstanden ist, hatten Astrophysiker eine klare Erwartung, wie viel davon sie in den Weiten des Alls finden würden.

Also addierten sie alles, was sie von dieser so genannten baryonischen Materie, das heißt gewöhnlichen Atomen und Molekülen, mit Teleskopen sehen konnten. Deren Menge machte jedoch insgesamt nur etwa zehn Prozent dessen aus, was die Forscher erwartet hatten (das hat nichts mit der berüchtigten »Dunklen Materie« zu tun, bei der es sich um ein völlig eigenständiges Rätsel handelt). Der Verbleib der übrigen Atome blieb ungeklärt.

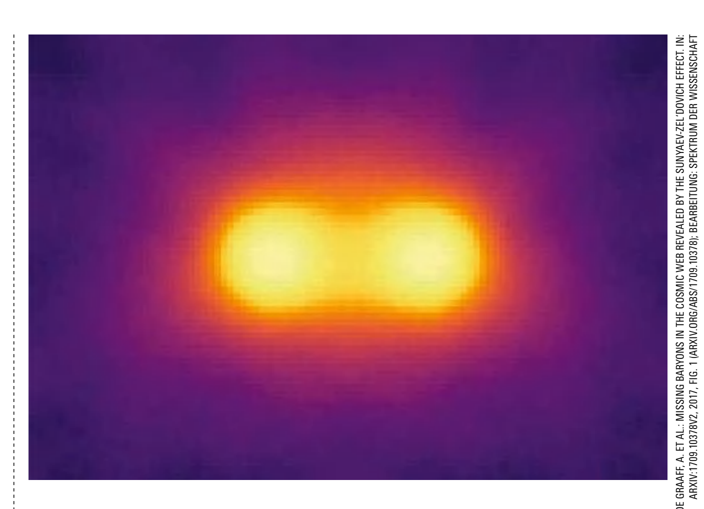
Im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten haben die Astronomen nun die restliche gewöhnliche Materie identifiziert. Und obwohl es so lange gedauert hat, entdeckten die Forscher sie genau dort, wo sie schon immer erwartet worden war: in ausgedehnten Filamenten aus heißem Gas, welche die Zwischenräume von Galaxien überspannen. Die Strukturen werden das warm-heiße intergalaktische Medium genannt (warm-hot intergalactic medium, WHIM).

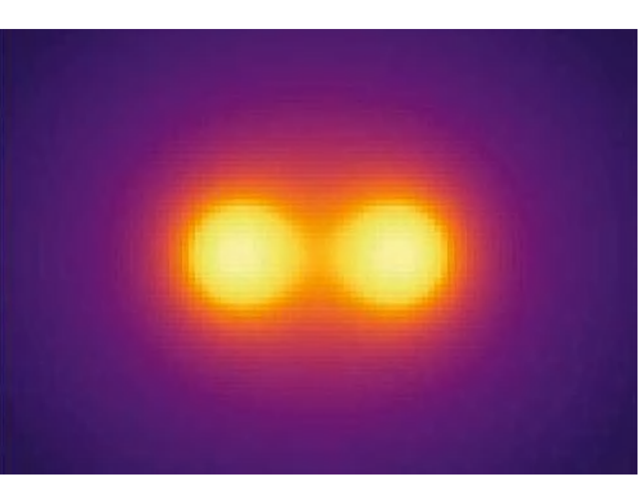
Viele Hinweise, doch keine heiße Spur

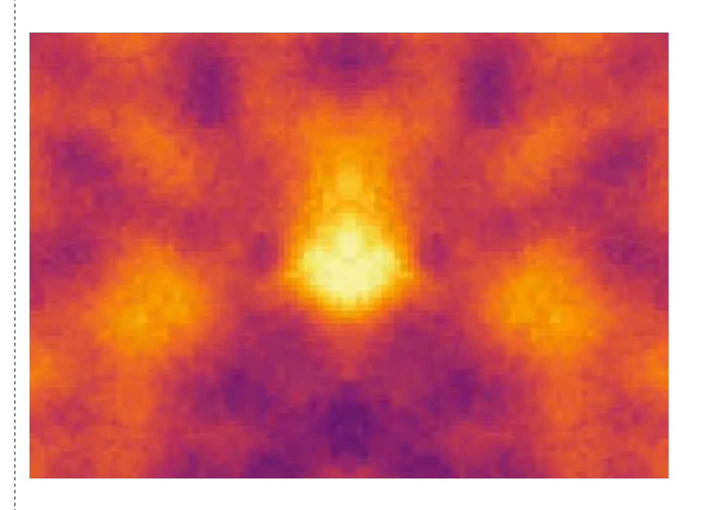
Erste Hinweise darauf, dass es zwischen den Galaxien große Bereiche von nahezu unsichtbarem Gas geben könnte, stammen aus Computersimulationen von 1998. »Wir wollten sehen, was mit dem ganzen Gas im Universum passiert«, erinnert sich Jeremiah Ostriker, ein Kosmologe an der Princeton University, der zusammen mit seinem Kollegen Renyue Cen eine der Simulationen durchgeführt hat. Die beiden untersuchten, wie Gravitationswirkungen, Strahlung, Supernova-Explosionen und sonstige Kräfte die Materie im Raum bewegen. »Wir kamen zu dem Schluss, dass sich das Gas in beobachtbaren Filamenten anreichern wird«, resümiert er. Aber in Himmelsdurchmusterungen tauchte keine Spur der kosmischen Strukturen auf.

»Es war von Anfang an klar, dass viele der Baryonen in einer heißen, diffusen Form vorliegen würden – nicht in Galaxien«, sagt Ian McCarthy, Astrophysiker an der britischen Liverpool John Moores University. Die Astronomen erwarteten die heißen Teilchen eingebettet in einen kosmischen Überbau aus unsichtbarer Dunkler Materie, der die immensen Leerräume zwischen den Galaxien überspannt. Die Gravitation der Dunklen Materie würde das Gas zu sich ziehen und es auf Millionen Grad erhitzen. Leider ist heißes, diffuses Gas extrem schwer aufzuspüren.

Einige Forscherteams suchten danach und fanden zumindest Teile der fehlenden Materie. Bis 2014 hatten die Astronomen immerhin rund 70 Prozent davon identifiziert. Um die fehlenden 30 Prozent ausfindig zu machen, spürten zwei unabhängige Teams Verzerrungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund (cosmic microwave background, CMB) nach, der vom Urknall übrig gebliebenen Strahlung. Wenn das Licht des frühen Universums durch den Kosmos strömt, können die durchquerten Regionen es beeinflussen.







DE GRAAFF, A. ET AL.: MISSING BARYONS IN THE COSMIC WEB REVEALED BY THE SUNYAEV-ZEL'DOVICH EFFECT. IN: ARXIV:1709.10378V2, 2017, FIG. 1 (ARXIV.ORG/ABS/1709.10378); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Um die normalerweise unsichtbare Materie aufzuspüren, überlagern Forscher die Streuung der kosmischen Hintergrundstrahlung am heißen Gas sehr vieler Galaxien. Dazu ziehen sie vom sämtlichen gemessenen Gas einer Million Galaxienpaare (oben) die zu den Galaxien gehörende, modellierte Materie (Mitte) ab. In der Differenz zwischen Modell und Beobachtung ist das intergalaktische Gas zu erkennen (unten).

Insbesondere sollten die Elektronen in heißem, ionisiertem Gas (wie dem WHIM) mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung auf eine Weise wechselwirken, die den Photonen zusätzliche Energie verleiht (Experten sprechen vom Sunyaev-Zel'dovich-Effekt). Das sollte das CMB-Spektrum merklich verzerren.

Doch selbst die besten Karten des CMB, erstellt mit dem Planck-Satelliten, zeigten keine solchen Verzerrungen. Entweder war das Gas gar nicht da, oder der Effekt war zu klein. Die beiden Teams waren sich auf Basis immer detaillierterer Computersimulationen allerdings sicher, dass sich Gas zwischen massereichen Galaxien wie Spinnweben spannen muss. Daher entwickelten die Forscher eine raffinierte Methode, um das schwache Signal millionenfach zu verstärken. Zuerst suchten die Astrophysiker in Katalogen bekannter Galaxien nach geeigneten Paaren, die ausreichend massereich waren und sich im richtigen Abstand für ein relativ dichtes Netz aus Gas dazwischen befanden. Dann nahmen sich die Astrophysiker die Daten der Planck-Karte vor und identifizierten im CMB den Bereich des Himmels, wo sich jedes Galaxienpaar befand.

Erst ein kosmischer Leuchtturm brachte den unabhängigen Nachweis

Im Fall der Studie von Anna de Graaff, einer Doktorandin an der University of Edinburgh, gab es mehr als eine Million solcher Ausschnitte. Die Gruppe unter der Leitung von Hideki Tanimura am französischen Institut für Weltraumastrophysik in Orsay kombinierte 260 000 Galaxienpaare. Die Forscher drehten so lange jedes Bild und zoomten hinein oder heraus, bis die Positionen sämtlicher Partner übereinstimmten. Dann stapelten sie alle übereinander. Als sie das Licht der eigentlichen Galaxien herausrechneten, wurden die geisterhaften Fäden aus diffusem, heißem Gas sichtbar.

Doch die Methode hat ihre Tücken. Die Interpretation der Ergebnisse, mahnt Michael Shull von der University of Colorado in Boulder, erfordere Annahmen über die Temperatur und die räumliche Verteilung des heißen Gases. Und wegen der Kombination großer Datenmengen laufe man Gefahr, die Bedeutung schwacher Signale falsch einzuschätzen: »Wie man manchmal beispielsweise bei Meinungsumfragen sieht, erhält man fehlerhafte Ergebnisse, wenn systematische Effekte die Statistiken verzerren.«

Auch wegen solcher Bedenken hielten die meisten Kosmologen das Rätsel der fehlenden Materie damit noch nicht für gelöst. Das änderte sich im Juni 2018, als Wissenschaftler eine unabhängige Strategie vorstellten, um das heiße Gas zu vermessen. Während die ersten beiden Forscherteams die Signale aufeinandergestapelt hatten, beobachtete ein drittes einen fernen Quasar, ein extrem helles Objekt, das einige Milliarden Lichtjahre entfernt ist. Mit Hilfe seiner Strahlung konnten die Wissenschaftler Gas im scheinbar leeren, intergalaktischen Raum detektieren. Es war, als würde man den Strahl eines fernen Leuchtturms benutzen, um den Nebel um ihn herum zu untersuchen.

Wenn Astronomen normalerweise so einen Ansatz verfolgen, suchen sie nach Licht, das von atomarem Wasserstoff absorbiert wurde – das häufigste Element im Universum. Doch das gesuchte intergalaktische Medium ist so heiß, dass es Wasserstoff ionisiert, also sein einzelnes Elektron entfernt. Das Ergebnis ist ein Plasma aus freien Protonen und Elektronen, die kein Licht absorbieren.

Also hielt die Gruppe nach einem anderen Element Ausschau: Sauerstoff. Zwar gibt es im Raum zwischen den Galaxien nicht annähernd so viel davon wie Wasserstoff, aber atomarer Sauerstoff besitzt acht Elektronen. Die Energie des heißen intergalaktischen Mediums entfernt die meisten davon – jedoch nicht alle. Das Team unter der Leitung von Fabrizio Nicastro vom Nationalen Institut für Astrophysik in Rom verfolgte das Licht, das von Sauerstoff mit zwei verbliebenen Elektronen absorbiert wurde.

Die Forscher fanden zwei Bereiche mit heißem intergalaktischen Gas. Der Sauerstoff deute auf ein viel größeres Reservoir an Wasserstoff und Helium hin, erklärt Shull, der zu Nicastros Gruppe gehört. Die Astronomen extrapolierten die Gasmenge, die sie zwischen der Erde und dem Quasar fanden, auf das Universum als Ganzes. Es scheint demnach, als könnten sie so die fehlenden 30 Prozent erklären.

Die Zahl stimmt gut mit den Ergebnissen der CMB-Untersuchungen überein. »Die Gruppen betrachten verschiedene Teile desselben Puzzles und kommen zur gleichen Antwort, was angesichts der methodischen Unterschiede beruhigend ist«, kommentiert Mike Boylan-Kolchin, ein Astronom an der University of Texas. Laut Shull wird der nächste Schritt sein, mehr Quasare mit empfindlicheren Röntgen- und Ultraviolett-Teleskopen anzuvisieren: »Der Quasar, den wir beobachtet haben, war der beste und hellste verfügbare Leuchtturm. Andere werden schwächer sein, und die Messungen werden länger dauern.« Im Moment jedenfalls sind sich die Astronomen ihrer Sache sicher. »Wir kommen zu dem Schluss, dass die fehlenden Baryonen gefunden worden sind«, schreibt das Forscherteam im letzten Satz ihrer Veröffentlichung. ◂

Katia Moskvitch ist Wissenschaftsjournalistin in London.

QUELLEN

De Graaff, A. et al.: Missing Baryons in the Cosmic Web Tevealed by the Sunyaev-Zel'dovich Effect. In: arXiv:1709.10378, 2017

Nicastro F. et al.: Observations of the Missing Baryons in the Warm–Hot Intergalactic Medium. In: Nature 558, S. 406–409, 2018

Tanimura, H. et al.: Detection of Intercluster Gas in Superclusters Using the Thermal Sunyaev-Zel'dovich Effect. In: arXiv:1805.04555, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The Last of the Universe's Ordinary Matter Has Been Found« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



GEWÄSSERCHEMIE
ALTLASTEN VERZÖGERN RÜCKGANG VON TODESZONEN

Unmengen Stickstoff aus Abwässern und Düngemitteln gelangen weltweit über Flüsse ins Meer und sorgen dort für Sauerstoffmangel. Weil Böden und Grundwasser überschüssige Nährstoffe speichern und nur verzögert freisetzen, kann es selbst bei einer drastisch reduzierten Stickstoffzufuhr Jahrzehnte dauern, bis sich Küstenmeere erholen.



NASA EARTH OBSERVATORY / LIAM GUMLEY, SPACE SCIENCE AND ENGINEERING CENTER (SSEC) AND THE MODIS SCIENCE TEAM

Nach 3778 Kilometern mündet der Mississippi an der Küste Louisianas in den Golf von Mexiko. Außer Sediment verfrachtet er große Mengen Stickstoff ins Meer.

Das Überangebot an Stickstoff und Phosphat in vielen Gewässern ist eines der dringlichsten Umweltprobleme im 21. Jahrhundert. Für die hohe Nährstoffbelastung sind neben ungeklärten Abwässern vor allem Viehzucht und Ackerbau verantwortlich. Seit 1950 ist der Einsatz von Düngemitteln global um das Zehnfache gestiegen. Von 1970 bis 2000 hat die Menge an Stickstoff, die Flüsse in den Ozean verfrachten, um 43 Prozent zugenommen. Mehr als drei Viertel davon stammen aus der Landwirtschaft.

An den Küsten bewirken die überschüssigen Nährstoffe, dass sich Algen massenhaft vermehren. Wenn diese sterben, sinken sie Richtung Meeresboden. Währenddessen recyceln Bakterien die Biomasse, was aber viel Sauerstoff verbraucht. Auf diese Weise entstehen sauerstoffarme (hypoxische) Zonen, in denen Fische, Muscheln, Garnelen und andere Meerestiere nicht überleben (siehe **Spektrum** November 2018, S. 58). Seit 1950 wurden weltweit mehr als 500 solcher »Todeszonen« entdeckt. Wissenschaftler gehen zudem von einer hohen Dunkelziffer aus, da vor allem ärmere Länder den ökologischen Zustand ihrer Gewässer oft kaum überwachen.

Todeszone im Mississippi

Eine der am besten untersuchten hypoxischen Zonen erstreckt sich im Golf von Mexiko entlang der Küste des US-Bundesstaats Louisiana. Hier mündet der Mississippi, der weite Teile Nordamerikas entwässert. Um das Nährstoffproblem im von industrieller Landwirtschaft geprägten Einzugsgebiet des Flusses und die Sauerstoffknappheit vor der Küste in den Griff zu bekommen, wurde 1997 eine Hypoxia-Taskforce ins Leben gerufen, mit dem Auftrag dazu Lösungen zu erarbeiten. Ihre Zielsetzung: Die hypoxische Zone sollte bis 2015 auf weniger als 5000 Quadratkilometer schrumpfen. Dafür, so die damalige Schätzung, müsste die Menge an Stickstoff, die das Meer erreicht, um wenigstens 60 Prozent abnehmen.

Obwohl man viele Millionen Dollar investierte, landwirtschaftliche Nutzflächen renaturierte, Pufferstreifen entlang von Flüssen errichtete und Düngergaben optimierte, wurde das Vorhaben weit verfehlt. In den vergangenen fünf Jahren betrug die Ausdehnung der Todeszone im Durchschnitt das Dreifache der Zielgröße. 2017 erstreckte sie sich gar über knapp 23 000 Quadratkilometer und war damit größer als jemals zuvor seit Beginn der systematischen Erfassung im Jahr 1985. Zwar maß sie 2018 überraschenderweise nur rund 7000 Quadratkilometer. Der unerwartet hohe Sauerstoffgehalt dürfte jedoch nur ein kurzfristiger Ausreißer gewesen sein und war offenbar günstigen Winden und einer ungewöhnlich schwachen Schichtung von Süß- und Salzwasser nahe der Küste geschuldet.

Als neues Zieljahr gilt inzwischen 2035. Kürzlich warnten kanadische Forscher um die Hydrologin Kimberley Van Meter von der University of Waterloo in Ontario jedoch, dass sich wohl auch das neue Datum nicht einhalten lässt: weil Böden und Grundwasser entlang des Mississippi und seinen Zuflüssen Stickstoff speichern, der zum Großteil bereits in den 1970er und 1980er Jahren als Dünger ausgebracht wurde. Ihren Analysen zufolge dürfte es noch Jahrzehnte dauern, bis die Altlasten abgebaut sind.

Anhand eines Computermodells ermittelten die Forscher, inwiefern dieser »Nährstoff-Memory-Effekt« die Erholung der Küstengewässer Louisianas verzögert. Sie validierten ihr Modell zunächst anhand von zwei Phasen in der Vergangenheit, die mit einer Intensivierung der Landwirtschaft in der Region einhergingen: die großflächige Umwandlung von ursprünglicher Prärie in Ackerland durch europäische Siedler von 1820 bis 1930 und der massive Anstieg beim Einsatz von synthetischem Stickstoffdünger in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Für beide Zeiträume wies die berechnete Nitratbelastung des nördlichen Golfs von Mexiko denselben positiven Trend auf wie

die aus Sedimentproben rekonstruierte damalige Algenbiomasse – welche die jeweilige Größe der Todeszone in hohem Maß bestimmt.

Anschließend modellierten die Forscher für verschiedene Szenarien der Landnutzung, wie sich die vom Mississippi ins Meer entlassene Menge an Stickstoff langfristig entwickeln würde. Das Ergebnis: Verharren die landwirtschaftlichen Nährstoffüberschüsse auf dem gegenwärtigen Niveau, ist mit einem Rückgang von lediglich elf Prozent bis 2050 zu rechnen. Durch besseres Management – zum Beispiel eine effizientere Düngung oder den Anbau mehrjähriger Feldfrüchte – ließe sich die Stickstoffbelastung im Golf von Mexiko erheblich stärker reduzieren. Doch das 60-Prozent-Ziel, das man erreichen muss, um die Todeszone dauerhaft auf unter 5000 Quadratkilometer zu bringen, würde ab sofort eine 100-prozentige Düngerverwertung in der Landwirtschaft erfordern. Ein solches Szenario ist nicht nur unrealistisch, es bestünde auch die Gefahr von Ertragseinbußen. Und selbst wenn es gelänge, jegliche Überschüsse aus Ackerbau und Viehhaltung kurzfristig zu eliminieren, würde die Stickstoffbelastung vor der Küste Louisianas laut Modell frühestens 2045 ausreichend zurückgegangen sein, zehn Jahre später als momentan anvisiert.

Erbe der industriellen Landwirtschaft

Schuld daran ist offenbar der exzessive Einsatz von Düngemitteln in der Vergangenheit, kombiniert mit einer langen Verweildauer des Stickstoffs in Boden und Wasserkreislauf. Kimberly und ihre Kollegen errechneten, dass gut die Hälfte des Nitrats, das den nördlichen Golf von Mexiko gegenwärtig erreicht, vor mehr als 30 Jahren als Kunstdünger oder Gülle ausgebracht wurde. Insbesondere organisch gebundenen Stickstoff setzen Ackerflächen oft nur verzögert frei, und zwar erst nachdem Bodenbakterien diesen in eine anorganische Form überführt haben, die der Regen leichter auswäscht. Zudem kann der sehr langsame Austausch von Grundwasser dafür sorgen, dass versickerte Nährstoffe über Jahrzehnte im System verbleiben.

Das Erbe der industriellen Landwirtschaft verhindert nach Aussage der Forscher, dass die angestrebte Wasserqualität trotz stellenweise rückläufiger Nährstoffüberschüsse im Einzugsgebiet des Mississippi zeitnah möglich ist. In Zukunft müsse man nicht nur wesentlich gezielter und weniger düngen, sondern auch stärker mehrjährige Pflanzen wie Präriegras anbauen, die Nährstoffe dank ihrer ausgedehnten Wurzeln effizienter aufnehmen. Den Prozess beschleunigen könnte zudem eine großflächige Renaturierung ehemaliger Feuchtgebiete. Denn dort herrschen ideale Bedingungen für Bakterien, die Nitrat und andere stickstoffhaltige Moleküle in Stickstoffgas umwandeln – und das können die meisten Algen nicht verwerten.

Dass sich solche Maßnahmen auf Dauer auszahlen, beweist die größte Flussmündung der USA, die Chesapeake Bay an der Atlantikküste der Bundesstaaten Maryland und Virginia. Zahlreiche Flüsse, darunter der James River und der Potomac River, entlassen hier große Mengen Nährstoffe in die Bucht. Alljährlich entsteht dadurch nach der Algenblüte im Frühjahr eine Todeszone, die über den Sommer stark anschwillt. In den 1960er und 1970er Jahren verschwanden durch die Überdüngung des Ökosystems zudem Seegras und andere Pflanzen auf einer Fläche von einigen zehntausend Hektar. Vor allem Stickstoff aus der Landwirtschaft sorgte dafür, dass Algen die Seegraswiesen überwucherten.

Doch laut einer aktuellen Studie von Umweltforschern um Jonathan Lefcheck vom Bigelow Laboratory for Ocean Health in Maine ist es in den letzten Jahrzehnten gelungen, die Wasserqualität zu verbessern und den dramatischen Rückgang der Unterwasservegetation zu stoppen: Zwischen 1984 und 2015 ist die Stickstoffzufuhr um durchschnittlich 23 Prozent gesunken. Im selben Zeitraum hat das Seegras 17 000 Hektar Meeresboden zurückerobert, das entspricht einem Zuwachs von über 300 Prozent. In den Abschnitten der Chesapeake Bay, wo die Nährstoffbelastung heute deutlich geringer ist, steigt der Sauerstoffgehalt wieder an und verdrängt die Todeszone allmählich. ◂

Tim Kalvelage ist promovierter Biogeochemiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

Breitburg, D. et al.: Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. In: Science 359, 10.1126/science.aam7240, 2018

Lefcheck, J. S. et al.: Long-Term Nutrient Reductions Lead to the Unprecedented Recovery of a Temperate Coastal Region. In: PNAS 115, S. 3658–3662, 2018

Van Meter, K. J. et al.: Legacy Nitrogen May Prevent Achievement of Water Quality Goals in the Golf of Mexico. In: Science 360, S. 427–430, 2018

MATHEMATIK
KAMPF DER TITANEN

Nach sechs Jahren haben zwei berühmte Mathematiker offenbar einen Fehler in einem 500-seitigen Beweis der ABC-Vermutung gefunden. Der Autor hält jedoch weiterhin an seiner Argumentation fest. Wie steht es um eines der größten Rätsel der Zahlentheorie?

▸ 2012 stockte Mathematikern weltweit der Atem: Der renommierte Japaner Shinichi Mochizuki von der Universität Kyoto hatte einen Beweis der ABC-Vermutung veröffentlicht, eines der weitreichendsten Probleme der Zahlentheorie (siehe **Spektrum** Februar 2004, S. 70). Doch die Begeisterung ebbte schnell wieder ab.

Denn seine 500-seitige Arbeit, die aus vier Hauptwerken besteht und sich auf weitere 500 Seiten früherer Ergebnisse bezieht, ist nur sehr schwer zu durchdringen. Trotz mehrerer Konferenzen, die sich diesem Thema widmeten, kämpfen Zahlentheoretiker noch immer damit, die zu Grunde liegenden Ideen des Japaners zu verstehen.

Bisher seien nur enge Kollegen von Mochizuki der Meinung, dass sein Beweis richtig ist, kommentiert Brian Conrad von der Stanford University. »Niemand sonst wagt es auch nur inoffiziell zu sagen, dass er von der Korrektheit der Arbeit überzeugt ist.« Andererseits vernahm man aber auch nur wenige Gegenstimmen, da Mathematiker keinen eindeutigen Fehler ausmachen konnten.

Das hat sich nun geändert. Der 30-jährige Fields-Medaillenpreisträger Peter Scholze von der Universität Bonn und Jakob Stix von der Goethe-Universität Frankfurt haben im September 2018 einen Bericht veröffentlicht, in dem sie behaupten eine »ernste, unlösbare Lücke« in dem enorm langen Beweis gefunden zu haben. »Ich denke, die ABC-Vermutung ist noch nicht gelöst«, äußert Scholze.

Zu diesem Schluss kam er gemeinsam mit seinem Kollegen Stix nach einem einwöchigen Besuch bei Mochizuki im März 2018. Das Treffen hatte einen unbefriedigenden Ausgang: Weder konnte der Japaner die Zweifel der beiden Deutschen ausräumen noch überzeugten sie ihn, dass sein Beweis fehlerhaft sei. Mochizuki führt ihre Kritik auf »grundlegende Missverständnisse« über sein Werk zurück. Ihre »negative Position«, sagt er, »impliziert nicht die Existenz von Fehlern jeglicher Art«. Da beide Parteien einen exzellenten wissenschaftlichen Ruf genießen, nimmt die Fachwelt sowohl Mochizukis Argumentation als auch die Einwände der deutschen Forscher ernst. Scholze hofft, dass bald Einigkeit um den Status der ABC-Vermutung herrschen wird.

Die erstmals in den 1980er Jahren formulierte Vermutung beginnt mit einer einfachen Gleichung: $A + B = C$. Dabei sind A, B und C positive ganze Zahlen, die keine gemeinsamen Primfaktoren haben. Beispiele dafür sind 8 + 9 = 17 oder 5 + 16 = 21, aber nicht 6 + 9 = 15, da 6, 9 und 15 sämtlich durch 3 teilbar sind.

Die Gleichung 5 + 16 = 21 ist ein typisches Beispiel für die meisten ABC-Tripel: Wenn man alle Primzahlen, die eine der drei Zahlen teilen (5, 2, 3 und 7), miteinander multipliziert, erhält man 210, was viel größer ist als $C = 21$. Im Gegensatz dazu ist für den Fall 5 + 27 = 32 das Produkt der Primzahlen $5 \cdot 2 \cdot 3 = 30$ kleiner als $C = 32$. Das liegt daran, dass 27 und 32 nur kleine Primfaktoren (3 und 2) haben, die sich oft wiederholen.

Untersucht man andere ABC-Gleichungen, stellt man fest, dass das zweite Szenario extrem selten ist. Und genau das besagt die ABC-Vermutung anschaulich. Unter den 3044 verschiedenen teilerfremden Tripeln, für die A und B zwischen 1 und 100 liegen, gibt es beispielsweise nur sieben Kombinationen, bei denen das Produkt ihrer Primzahlen kleiner ist als C.

Selbst in dem Fall 5 + 27 = 32 ist 32 zwar größer als 30, aber nur ein bisschen. 32 ist immer noch kleiner als 30^2, $30^{1,5}$ oder sogar $30^{1,02}$. Im Detail lautet die ABC-Vermutung,

dass es für jede Zahl x, die größer als eins ist, nur endlich viele ABC-Tripel gibt, für die C größer ist als das Primzahlprodukt hoch x.

Da die Gleichung $A + B = C$ so einfach ist, hängen viele andere Probleme mit der ABC-Vermutung zusammen. Zum Beispiel beschäftigt sich Fermats letzter Satz mit Lösungen von $x^n + y^n = z^n$. In der bereits bewiesenen catalanschen Vermutung, die besagt, dass 2^3 und 3^2 die einzigen beiden aufeinanderfolgenden »echten« Potenzen sind (da $2^3 = 8$ und $3^2 = 9$), geht es um die Gleichung $x^n + 1 = y^n$. Die ABC-Vermutung würde zu neuen Beweisen für beide Theoreme führen und einige damit verbundene Probleme lösen.

Als 2012 die Nachricht aufkam, dass Mochizuki die ABC-Vermutung bewiesen habe, tauchten viele Zahlentheoretiker begeistert in sein Werk ein – doch schnell bremste sie der ungewöhnliche Stil Mochizukis. Auf seitenlange Definitionen folgen ebenso lange Theoreme, deren Beweise im Wesentlichen nur besagen, dass »die Behauptung unmittelbar aus den Definitionen folgt«.

Scholze zählte zu den ersten Lesern der Arbeit. Eigentlich ist der Deutsche für seine Fähigkeit bekannt, mathematische Inhalte schnell zu verinnerlichen. Doch auch ihn verwirrten die langen Theoreme mit ihren kurzen Beweisen.

Und dann stieß er auf »Korollar 3.12« im dritten Teil der Arbeit. Üblicherweise bezeichnen Mathematiker einen Satz als »Korollar«, wenn er aus einem früheren, wichtigeren Theorem folgt. Korollar 3.12 ist dagegen das Herzstück von Mochizukis Werk. Anders als die meisten anderen darin enthaltenen Sätze, füllt sein Beweis neun Seiten. Als Scholze sie durcharbeitete, erreichte er einen Punkt, an dem er Mochizukis Logik nicht mehr folgen konnte.

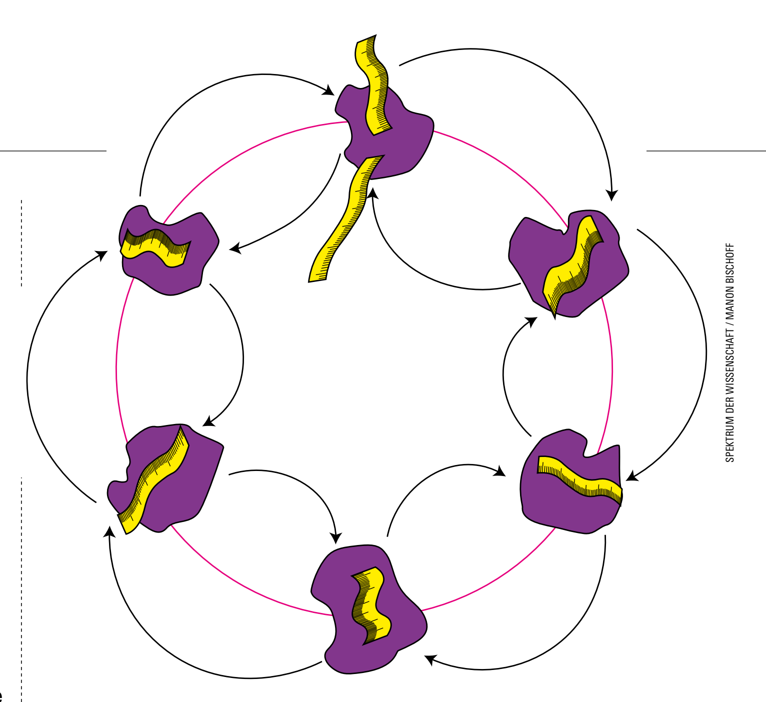
Fehler im Schlüsselbeweis?

Der damals erst 24-Jährige glaubte, auf eine Unstimmigkeit gestoßen zu sein. Seinen Verdacht äußerte er jedoch nicht öffentlich. Er ging davon aus, dass Mathematiker schnell seine Bedenken teilen oder ausräumen würden. Doch auch seine Kollegen hatten mit der umfangreichen Arbeit zu kämpfen. Viele setzten große Hoffnungen in eine Konferenz, die Ende 2015 an der University of Oxford Mochizukis Werk gewidmet war (siehe **Spektrum** März 2016, S. 14). Doch als mehrere enge Mitarbeiter des Japaners versuchten, die Ideen seines Beweises zu beschreiben, sei eine »Nebelwolke« über die Zuhörer hereingebrochen, schilderte der Teilnehmer Brian Conrad damals in seinem Blog.

Wenige Tage nach seinem Kommentar erhielt Conrad E-Mails von drei Mathematikern, darunter auch Scholze, mit dem gleichen Inhalt: Die Forscher könnten Mochizukis Beweis folgen, allerdings nur bis Korollar 3.12.

Und auch Jakob Stix scheiterte an der gleichen Stelle. Allmählich kristallisierte sich das Korollar als Knackpunkt der Arbeit heraus. Es stellte sich die Frage, ob es wirklich fehlerhaft war oder ob Mochizuki seine Schritte bloß klarer ausarbeiten musste.

Ende 2017 heizte sich die Debatte weiter auf. Es sprach sich herum, dass der Beweis des Japaners in der wissenschaftlichen Zeitschrift »Publications of the Research



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

In Scholzes und Stix' Vereinfachung von Mochizukis Beweis zu Korollar 3.12 befinden sich sechs Exemplare der reellen Zahlen (lila) auf einem Kreis (rot). Abbildungen (schwarze Pfeile) transformieren die Maßstäbe (gelb) eines Exemplars in ein anderes. Umrundet man mit einem Maßstab den Kreis der sechs Exemplare, sieht er am Ende anders aus, als am Anfang (oben).

Institute for Mathematical Sciences« (PRIMS) veröffentlicht werden sollte. Die Fachwelt empörte sich darüber, dass Mozichuki zu diesem Zeitpunkt Chefredakteur der Fachzeitschrift war. Doch viel mehr störten sich Zahlentheoretiker an der Tatsache, dass die Arbeit noch immer nicht verständlich war. Nach einigen Protesten gab »PRIMS« schließlich bekannt, den Beweis nicht akzeptiert zu haben.

Unter den Kritikern befand sich auch Scholze, der damals seine Bedenken zu Korollar 3.12 erstmals öffentlich äußerte. Kurz darauf bot ihm der Fields-Medaillengewinner Shigefumi Mori an, ein Treffen mit seinem Kollegen Mochizuki an der Universität Kyoto zu ermöglichen. Scholze lud auch Stix ein, der ein Experte auf Mochizukis Forschungsgebiet ist, und im März 2018 reisten die beiden deutschen Mathematiker nach Japan.

Mochizukis Ansatz zur Lösung der ABC-Vermutung ist nicht neu: Er übersetzt das Problem in eine Aufgabe zu »elliptischen Kurven«. Diese kubischen Gleichungen aus zwei Variablen sind eine Art mathematische Superstars (siehe **Spektrum** Januar 2009, S. 62). Ihre Besonderheit liegt darin, die Zahlentheorie mit der Geometrie, der Analysis und anderen mathematischen Bereichen zu verbinden. Sie halfen schon 1994 Andrew Wiles dabei, Fermats letzten Satz zu beweisen (siehe **Spektrum** Januar 1998, S. 96).

Im Fall der ABC-Vermutung konstruiert man zu jeder ABC-Gleichung eine elliptische Kurve, deren Graph die x-Achse bei a, b und dem Ursprung kreuzt. Die Vermutung ist bewiesen, wenn man zeigen kann, dass von zwei Größen, die der elliptischen Kurve zugeordnet sind, die eine größer ist als die andere. Mochizuki hat diese Ungleichung in eine weitere Form übersetzt, wodurch er das Volumen

zweier abstrakter Mengen vergleichen muss. In Korollar 3.12 behauptet der Japaner, dass seine Ungleichung auch für diese Volumina gilt. Daraus würde die ABC-Vermutung folgen.

Der Beweis von Korollar 3.12 ist ziemlich kompliziert. Nachdem Scholze und Stix die Berechnungen Mochizukis vereinfachten, ergab sich folgendes Bild: Beide Mengen, um deren Volumen es geht, sind Teilmengen der reellen Zahlen. Es ist also nicht Volumen im üblichen Sinn gemeint, sondern ein Maß für die »Größe« einer Teilmenge. Jede Teilmenge lebt sozusagen auf ihrem eigenen Exemplar der Gesamtmenge der reellen Zahlen, die über weitere solche Exemplare miteinander verknüpft sind. In der Vereinfachung von Scholze und Stix bilden sechs Exemplare der reellen Zahlen einen Kreis, und es gibt Abbildungen, die sie jeweils mit ihrem unmittelbaren Nachbarn verbinden.

Verhängnisvoller Größenvergleich

Um die Volumina der Teilmengen zu vergleichen, muss man wissen, wie man sie für jedes Exemplar ineinander umrechnet. Dazu dienen die Abbildungen – anschaulich verwandeln sie einen Maßstab im einen Exemplar in einen verzerrten Maßstab eines anderen. Bei der Wahl dieser Abbildungen hat man gewisse Freiheiten. Genau an dieser Stelle glauben Scholze und Stix, dass etwas schiefläuft. Ihnen zufolge hat Mochizuki eine inkonsistente Wahl getroffen, so dass nicht der ursprüngliche Wert herauskommt, wenn man die Volumina einmal im Kreis ineinander umrechnet; oder die Ungleichung, die am Ende herauskommt, ist trivial und beweist nicht die ABC-Vermutung.

Mochizuki zufolge ist die Berechnung der zwei Deutschen zwar korrekt, doch ihre anfangs getroffenen Vereinfachungen seien es nicht. Sie würden dabei mathematische Objekte gleichsetzen, so der Japaner, die sich in Wirklichkeit unterscheiden. Als er seinen Kollegen davon erzählte, waren sie laut Mochizuki völlig erstaunt. Manche seien in Lachen ausgebrochen und hätten nicht geglaubt, »dass solche offensichtlichen Missverständnisse auftreten können«, schreibt er.

Für ihn rührt die Kritik von Scholze und Stix aus einem »Mangel an Zeit her, tiefgründig über die diskutierte Mathematik nachzudenken«. Dazu kämen noch »ein Unbehagen oder die Ungewohntheit, mit neuen Denkweisen zu vertrauten mathematischen Objekten umzugehen«.

In den letzten Jahren haben viele Zahlentheoretiker aufgegeben, auch nur zu versuchen, den Beweis der ABC-Vermutung zu verstehen. Die aktuelle Debatte »könnte aber ein Weg sein, um einen Teil dieser Verdrossenheit zu lindern und die Menschen zu motivieren, sich dem Thema wieder anzunehmen«, hofft Kiran Kedlaya von der University of California in San Diego.

Scholze bleibt bei seiner Meinung: »Ich denke, (die Arbeit) sollte nicht als Beweis angesehen werden, bis Mochizuki sie wesentlich überarbeitet hat und den entscheidenden Schritt besser erklärt.« Er fügt hinzu: »Ich habe nicht wirklich eine Schlüsselidee gesehen, die uns einem Beweis der ABC-Vermutung näher bringen würde.« ◂

Erica Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).

QUELLEN

Mochizuki, S.: Inter-Universal Teichmuller Theory I. In: www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~motizuki/Inter-universal%20Teichmuller%20Theory%20I.pdf, 2012

Scholze, P., Stix, J.: Why ABC Is still a Conjecture. In: www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~motizuki/SS2018-08.pdf, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Titans of Mathematics Clash Over Epic Proof of ABC Conjecture« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



GENETIK
DAS GEHEIMNIS DES GROSSEN GEHIRNS

Die wenigen bereits bekannten Erbfaktoren, die bei der Entwicklung des menschlichen Gehirns eine Rolle spielen, bekommen Gesellschaft. Forscher fanden eine für Menschen spezifische Gengruppe, die wohl eine entscheidende Aufgabe bei der Bildung der Großhirnrinde erfüllt – jenes Hirnareal, das uns zu abstraktem Denken befähigt.

▶ Warum ist das menschliche Gehirn derart leistungsfähig? In den zurückliegenden Jahren lieferten Erbgutanalysen erste Antworten auf diese Frage. Grundsätzlich spielen hier drei Faktoren eine Rolle: die Größe unseres Denkorgans, sein Aufbau und die Qualität der neuronalen Vernetzungen. Während in den letzten Jahren einige Gene entdeckt wurden, die vor allem die Reifung der Hirnzellen und die Ausbildung der Nervenverbindungen beeinflussen, blieb bisher noch weitgehend unklar, welche genetischen Mechanismen das eigentliche Wachstum unseres Gehirns kontrollieren.

Nun sind Forscher der Lösung dieses Rätsels ein Stück nähergekommen. Eine Gruppe von Genen, zusammengefasst unter der Bezeichnung NOTCH2NL, lässt menschliche Gehirne wachsen, und zwar vor allem den Neokortex – im Wesentlichen die äußerste Schicht unseres Großhirns. Neurowissenschaftler verorten hier die kognitiven Prozesse des abstrakten Denkens. Damit scheint der Neokortex vor allem für jene Fähigkeiten verantwortlich zu sein, die beim Menschen im Vergleich zu anderen Säugern besonders stark ausgeprägt sind, wie Lern- und Sprachbegabung, vorausschauendes Planen sowie ausgeprägtes Sozial- und Kooperationsverhalten. Entwicklungsgeschichtlich gilt er als einer der jüngsten Hirnteile. Evolutionsbiologen gehen

daher davon aus, dass die Entwicklung des Kortex für den *Homo sapiens* vermutlich wichtiger war als die alleinige Zunahme des Hirnvolumens, die sich seit dem Auftreten der Gattung *Homo* vor etwa 2,5 Millionen Jahren beobachten ließ.

Jetzt haben gleich zwei Forschergruppen herausgefunden, dass die NOTCH2NL-Genvarianten bei der Bildung des Neokortex offenbar eine wichtige Rolle spielen. An Zellgeweben menschlicher Föten untersuchten Genetiker um Pierre Vanderhaegen von der Université Libre de Bruxelles zunächst, welche Gene in verschiedenen Phasen der Hirnentwicklung beteiligt sind. Indem die Wissenschaftler RNA aus den Gewebeproben analysierten, fanden sie insgesamt 35 für Menschen spezifische, durch Genverdoppelung entstandene Erbanlagen, die während der Ausbildung des Neokortex aktiv sind – darunter auch vier Varianten (»Paraloge«) des NOTCH2-Rezeptorgens, dessen wichtige Rolle bei der Zellentwicklung bekannt ist.

Mehr Reifezeit für das Gehirn

Das Brüsseler Forscherteam sowie Wissenschaftler um David Haussler von der University of California in Santa Cruz untersuchten dann die Wirkungsweise der neu entdeckten NOTCH2NL-Gene an embryonalen Stammzellen. Sie entfernten dort beispielsweise die entsprechenden DNA-Abschnitte mittels der »Genschere« CRISPR/Cas9 und verglichen die weitere Entwicklung der Kulturen mit derjenigen von unbehandelten Zellen.

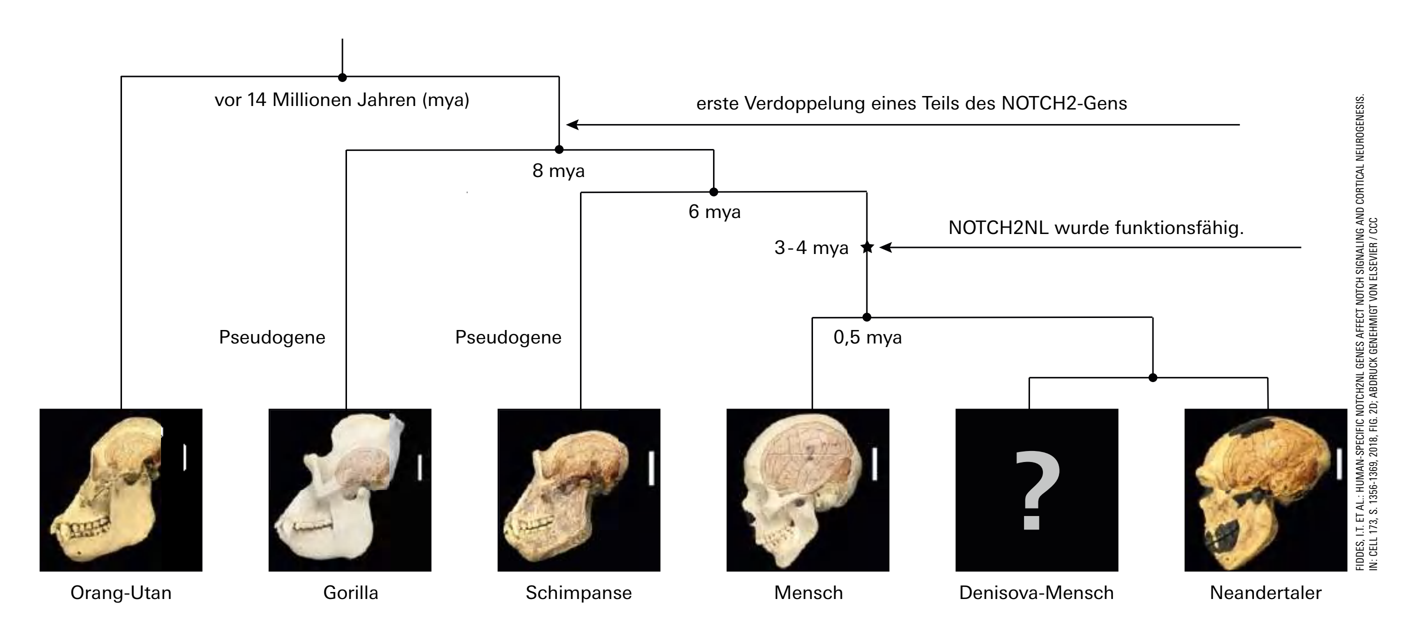
Dabei fanden beide Arbeitsgruppen, dass die meisten NOTCH2NL-Gene in den Stammzellen hochaktiv sind und hier eine verzögerte Zelldifferenzierung bewirken. Das bedeutet eine wesentlich längere Reifungsphase des Gehirns, in der auch mehr Zellen entstehen, die sich zu kortikalen Vorläuferzellen differenzieren und schließlich zu Hirnzellen heranreifen. Dies ist wohl ein entscheidender Mechanismus, der zur Entwicklung des großen menschlichen Neokortex führt.

Es handelt sich also offenbar um eine wichtige Genmutation innerhalb der menschlichen Abstammungslinie. Wie der von Haussler und seinen Kollegen durchgeführte Erbgutvergleich mit Schimpansen und Gorillas zeigte, besitzen Menschenaffen keine funktionalen NOTCH2NL-Gene. Stattdessen weisen sie entsprechende Pseudogene auf, die keine Proteine bilden. Diese waren wohl in einem gemeinsamen Vorfahren durch Verdoppelung eines Teils des NOTCH2-Gens entstanden (siehe Bild unten).

Erst nachdem sich Schimpansen und Menschen auseinanderentwickelt haben, muss es zu der entscheidenden Erbgutveränderung gekommen sein, die NOTCH2NL in der Menschenlinie funktionsfähig machte. Die Wissenschaftler datieren das auf den Zeitraum zwischen drei und vier Millionen Jahren vor heute.

Diese Chronologie scheint sich in groben Zügen auch in der Entwicklung der Schädelgrößen widerzuspiegeln. So vergrößerte sich das Gehirn mit dem Erscheinen der Gattung *Homo* vor zirka 2,5 Millionen Jahren stetig, was sehr wahrscheinlich mit artspezifischen Erbgutveränderungen wie jener der NOTCH2NL-Gene zusammenhing.

Diese sind aber wohl nicht allein für die Bildung des Neokortex verantwortlich, da Vanderhaegen und sein Team bei ihren Untersuchungen noch weit mehr Erbfaktoren gefunden haben, die dabei aktiv sind. Deren Funktion ist aber noch nicht genauer untersucht. Mehrere NOTCH2NL-Gene liegen auf dem menschlichen Chromosom 1 im



Ein Vergleich von Genvarianten zwischen verschiedenen Menschenaffen offenbart: Vor etwa drei bis vier Millionen Jahren gab es eine folgenreiche Veränderung, die NOTCH2NL für uns funktionsfähig machte. Unsere nächsten lebenden Verwandten, die Schimpansen und die Gorillas, besitzen nur inaktive Pseudogene.

Abschnitt 1q21.1. Die Region ist bekannt dafür, dass Gendefekte dort zu gravierenden Fehlentwicklungen des Gehirns sowie psychischen Erkrankungen führen können – darunter Mikro- und Makrozephalie, aber auch Autismus und Schizophrenie. Möglicherweise spielt NOTCH2NL hier eine Rolle: So fehlte bei einer Stichprobe von Mikro- und Makrozephaliepatienten entweder eine der Genversionen, oder es existierte ein zusätzliches Exemplar, wie die Arbeitsgruppe um Haussler beobachten konnte.

Eine lohnenswerte Investition

Damit könnten jene Genänderungen, die das größere menschliche Gehirn ermöglicht haben, auch das Risiko mancher Hirnerkrankungen erhöht haben. Und es gibt noch weitere Nachteile unserer großen und komplexen Denkapparate, beispielsweise sind sie wahre Energiefresser. Im Ruhezustand verbraucht das menschliche Gehirn etwa ein Fünftel des Energiebedarfs des gesamten Organismus – im Vergleich sind es bei Schimpansen gerade einmal acht bis zehn Prozent. Und schließlich führt die ausgedehnte Entwicklungszeit des Gehirns dazu, dass unser Nachwuchs viel länger unselbstständig bleibt und betreut werden muss.

Für die Evolution unserer Gattung stellte das immense biologische Kosten dar, die sich aber offenbar ausgezahlt haben. Sonst hätten sich die Erbgutveränderungen, die zu den größeren Gehirnen führten, nicht erhalten. Dank ihnen gelang es den verschiedenen Menschenarten mit der Zeit, sich an die unterschiedlichsten Habitate anzupassen und erfolgreich neue Nahrungsquellen zu erschließen. Die wechselnden Kalt- und Warmzeiten seit dem Quartär, das vor zirka 2,6 Millionen Jahren begann, stellten Lebewesen laufend vor neue Herausforderungen. Genau zu dieser Zeit begann auch die Entwicklung der verschiedenen Menschenarten mit ihren stetig wachsenden Gehirnen.

NOTCH2NL scheint an der Hirnentwicklung einen beachtlichen Anteil gehabt zu haben, wie seine Rolle bei der Ausbildung der Großhirnrinde und damit der kognitiven Leistungen nahelegen. Und dennoch ist die Geschichte wohl um einiges komplizierter. Denn über die genetischen Mechanismen und neurologischen Prozesse im Gehirn wissen wir noch längst nicht alles. ◂

Verena Leusch hat Ur- und Frühgeschichte in Wien und Tübingen studiert und ist Volontärin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Fiddes, I. et al.: Human-Specific NOTCH2NL Genes Affect NOTCH Signaling and Cortical Neurogenesis. In: Cell 173, S. 1356–1369, 2018

Suzuki, I. et al.: Human-Specific NOTCH2NL Genes Expand Cortical Neurogenesis through Delta/NOTCH Regulation. In: Cell 173, S. 1370–1384, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE

DER VARIABLE WERT DES LEBENS

In extremen Fällen muss man den Tod von Menschen in Kauf nehmen, um das Leben anderer zu schützen. Aus der moralischen Zwickmühle führt kein universelles Patentrezept.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwürfe ist als Buch unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

▸▸ spektrum.de/artikel/1609502

Bald werden selbstfahrende Autos am Verkehr teilnehmen. Durch schlaue Programmierung sollen sie kritische Situationen besser meistern als ein menschlicher Fahrer und werden im Regelfall wohl weniger Unfälle verursachen. Doch für den Fall, dass sie in einen solchen verwickelt werden, müssen die Entwickler vorsorgen. Das belebt seit einigen Jahren die Diskussion um ein moralisches Dilemma, über das wir uns sonst selten Gedanken machen.

Nehmen wir an, dem Lenker – ob Mensch oder Automat – bleibt nur die Wahl, entweder in eine plötzlich auftauchende Fußgängergruppe hineinzufahren oder beim Ausweichen das Fahrzeug samt Insassen in einen Abgrund zu stürzen. Die Entscheidung wird von verschiedenen Parametern abhängen, etwa von der Anzahl der potenziellen Opfer, vielleicht aber auch von deren Alter und Geschlecht. Bei der Diskussion um die Programmierung für solche Fälle wird stillschweigend vorausgesetzt, es gebe einen universellen, kulturübergreifend gültigen Moralcode. Wer würde nicht notfalls dem Überleben von drei jungen Frauen mit kleinen Kindern den Vorzug geben vor dem von zwei Greisen? Doch so einfach ist es nicht.

Seit mehreren Jahren erforscht der Informatiker Iyad Rahwan vom Massachusetts Institute of Technology die oft paradoxen Präferenzen, welche die Menschen von selbstfahrenden Autos verlangen: Im Prinzip sollen Fußgänger unbedingt geschützt werden – aber kaufen will man nur ein Auto, das stets den Insassen Vorrang gibt (siehe meinen Einwurf von August 2016).

Jetzt hat Rahwan das Nonplusultra einer Umfrage zum moralischen Dilemma vorgelegt. Sein Team stellte ein einfaches Straßenverkehrsspiel namens Moral Machine ins Netz, das bald mehr als zwei Millionen Menschen in 233 Ländern anregte, 40 Millionen Entscheidungen über Leben und Tod von Fußgängern oder Insassen zu treffen *(Nature 563, S. 59–64, 2018).*

Die Daten offenbaren durchaus globale Präferenzen: Die Mehrheit der Teilnehmer verschonte Menschen gegenüber Tieren, präferierte die jeweils größere Menschengruppe und bevorzugte Junge gegenüber Alten. Soll das aber tatsächlich heißen, Autos sollten künftig so programmiert werden, dass sie im Zweifelsfall Ältere gefährden, um Kinder zu schützen?

Das weltweite Orakel der »moralischen Maschine« offenbarte darüber hinaus allerdings überraschende kulturelle Differenzen. Als Rahwans Team das Spielverhalten nach dem Wohnort der Teilnehmer sortierte, schälten sich drei große »moralische Cluster« mit ähnlichen Präferenzen heraus. Ein westlicher Cluster umfasste Nordamerika und Europa, der östliche mehrere Länder im Fernen und Nahen Osten, und der südliche Cluster vor allem Südamerika.

Beispielsweise bevorzugt der so definierte Süden Frauen und Kinder viel stärker als der Osten, wo das Alter traditionell besonderen Respekt genießt; auch die höhere soziale Stellung gilt im Süden deutlich mehr als im Osten. Wo mehr ökonomische Ungleichheit herrscht, wird das Überleben der Reichen positiver gewichtet. Frauen haben im moralischen Dilemma generell bessere Karten als Männer, aber besonders in Regionen, wo mehr in ihre Gesundheit und Lebenserwartung investiert wird.

Ein interessantes Detail ist der Status der Fußgänger. Wenn sie in einem wohlhabenden und gesetzestreuen Land wie Deutschland bei Rot die Straße zu queren versuchen, sind sie deutlich gefährdeter als in einem armen Land mit schwacher Justiz, wo sich Fußgänger ohnedies auf den Straßen tummeln.

Wäre all das beim Programmieren selbstfahrender Autos einzukalkulieren? Oder will man sich auf das Ideal einer universellen Ethik verlassen, die, wie die moralische Maschine beweist, nirgends auf der Welt streng gilt?

MEDIZIN
DARMBAKTERIEN GEGEN KREBS

Die bakterielle Darmflora beeinflusst offenbar, wie gut Tumortherapien wirken. Lässt sich das medizinisch nutzen?


ELISE CHEN

Giorgia Guglielmi ist Wissenschaftsjournalistin und berichtet aus Washington D.C. für »Nature«.

spektrum.de/artikel/1609504

Im Jahr 2015 erlangte Bertrand Routy zweifelhafte Berühmtheit unter den Pariser Krebsmedizinern. Als Doktorand am Gustave-Roussy-Krebszentrum suchte er eine Klinik nach der anderen auf, um Stuhlproben von Patienten zu erbitten, die eine Krebstherapie hinter sich hatten. »Die Ärzte verspotteten mich und nannten mich Monsieur Kacka«, erinnert sich Routy.

Doch das Gelächter verebbte, als Routy und seine Mitarbeiter das Ergebnis ihrer Arbeit publizierten: Belege dafür, dass bestimmte Darmbakterien die Wirkung einer Krebsbehandlung verbessern. Nun wollen die gleichen Mediziner, die sich einst lustig machten, unbedingt Stuhlproben ihrer Patienten untersuchen lassen, um Hinweise darauf zu bekommen, wer voraussichtlich auf die geplante Behandlung ansprechen wird. »Unsere Daten haben einigen Kollegen die Augen geöffnet, die zuvor nicht glauben wollten, dass Darmbakterien die Effekte einer Tumortherapie beeinflussen«, berichtet Routy, der inzwischen am University of Montreal Health Centre in Kanada arbeitet.

In den zurückliegenden Jahrzehnten haben revolutionäre Erkenntnisse über die Bedeutung des menschlichen Mikrobioms (also der Gesamtheit der Mikroben, die den Menschen besiedeln) die Biomedizin gründlich umgekrempelt. Forscher erkannten Zusammenhänge zwischen der Darmflora und dutzenden Erkrankungen, von Depression bis Fettleibigkeit. In der Krebsmedizin kam diese Revolution erst ziemlich spät an. Immerhin liegen mittlerweile einige Hinweise darauf vor, dass das Mikrobiom Tumorerkrankungen mitverursachen kann. So begünstigen Entzündungen die Entstehung verschiedener Krebsarten, und es gibt infektionsbedingte Geschwulste. Doch erst, nachdem die Immuntherapien zum großen neuen Hoffnungsträger der Krebsmedizin aufgestiegen waren, begannen Forscher intensiver zu untersuchen, wie die Darmflora den Behandlungserfolg beeinflusst und wie sich dies therapeutisch nutzen lässt.

Nachdem erste Studien an Mäusen und auch mit menschlichen Teilnehmern gezeigt hatten, dass die Wirkung von Krebsmedikamenten stark abhängt von den Darmbakterien des behandelten Individuums, machten sich Wissenschaftler daran, die zu Grunde liegenden Mechanismen aufzuklären. Derzeit laufen mehrere klinische Studien, die klären helfen sollen, ob sich der Effekt einer Therapie verbessern lässt, indem man das Mikrobiom des Patienten verändert. Einige Befürworter hoffen darauf, dass dies die Krebsmedizin entscheidend voranbringen könnte. »Das ist ein viel versprechender Weg«, meint etwa Jennifer Wargo, Chirurgin und Onkologin am MD Anderson Cancer Center in Houston, Texas. Andere Wissenschaftler jedoch finden, dass es für klinische Studien noch zu früh sei. Der Epidemiologe William Hanage von der Harvard University (Cambridge, Massachusetts) nennt das Konzept »phänomenal interessant«, fügt jedoch hinzu: »Ich sorge mich ein wenig darum, dass verbreitet die Auffassung

AUF EINEN BLICK
HILFREICHE MIKROBEN

1. Welche Mikroorganismen uns besiedeln, hat einen großen Einfluss darauf, welche Krankheiten wir bekommen und wie erfolgreich deren Behandlung verläuft.

2. Krebsimmuntherapien schlagen bei Patienten besonders gut an, in deren Mikrobiom bestimmte Bakterienstämme vertreten sind.

3. Forscher untersuchen deshalb, ob sich die Darmflora von Krebspatienten so verändern lässt, dass die Therapie besser wirkt.



Chemotherapien gehören zu den Standardbehandlungen gegen Krebs. Bei manchen Patienten wirken sie gut, bei anderen schlagen sie deutlich schlechter an. Ein Grund für diese Variabilität ist, dass jeder Patient ein eigenes Mikrobiom besitzt – und nicht immer sind therapiefördernde Bakterienstämme darin ausreichend vertreten.

SOMKKU / GETTY IMAGES / ISTOCK

besteht, Veränderungen des Mikrobioms würden sich stets günstig auswirken.«

Obwohl ein breites Interesse am Themenkomplex Mikrobiom und Krebsimmuntherapie erst seit wenigen Jahren besteht, gibt es einige Forscher, die den Zusammenhang zwischen Magen-Darm-Bakterien und Tumorerkrankungen schon viel länger untersuchen. Bereits in den 1990er Jahren erkannten Wissenschaftler, dass chronische Infektionen mit dem Bakterium *Helicobacter pylori* das Risiko eines Magenkarzinoms erhöhen. Seither sind mehrere weitere Bakterienarten mit Krebs in Verbindung gebracht worden. Einige von ihnen provozieren Entzündungen und zerstören die Schleimschicht, die den Organismus vor äußeren Erregern schützt. Sie schaffen damit ein Milieu, welches das Tumorwachstum fördert. In anderen Fällen helfen die Mikroben entarteten Zellen, indem sie diese unempfindlich gegenüber Krebsmedikamenten machen.

Antibiotikabehandlungen können Krebsmedikamente unwirksam machen – jedenfalls bei Mäusen

Umgekehrt können Bakterien auch beim Bekämpfen von Tumoren helfen. Im Jahr 2013 haben ein Team um Laurence Zitvogel vom Gustave-Roussy-Krebszentrum und ein weiteres um Romina Goldszmid und Giorgio Trinchieri vom National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) gezeigt: Einige Krebstherapien sind darauf angewiesen, dass Darmbakterien die Immunreaktion verstärken.

Zitvogel und ihre Kollegen fanden heraus, dass das Zytostatikum Cyclophosphamid, das bei Chemotherapien eingesetzt wird, die Schleimschicht des Darms schädigt. Infolgedessen wandern Darmbakterien in Lymphknoten und Milz ein, wo sie bestimmte Immunzellen aktivieren. Bei Mäusen, die ohne Darmbakterien aufwachsen oder mit Antibiotika behandelt worden sind, ist der Arzneistoff als Krebsmedikament weitgehend unwirksam. Ausgehend von diesem Befund beschloss Zitvogel zu untersuchen, ob Darmmikroben auch die Wirkung so genannter Immuncheckpoint-Inhibitoren beeinflussen (siehe **Spektrum** August 2014, S. 30 und **Spektrum** Dezember 2018, S. 24). Bei ihnen handelt es sich um Antikörper, die an Oberflächenmoleküle von T-Lymphozyten binden und so verhindern, dass die T-Zellen gehemmt werden. Immuncheckpoint-Inhibitoren richten sich beispielsweise gegen die T-Zell-Oberflächenmoleküle CTLA-4 oder PD-1 und entfesseln die Immunreaktion gegen Tumorzellen; sie werden zur Behandlung verschiedener Krebsarten eingesetzt. Leider schlägt die Therapie nur bei 20 bis 40 Prozent der Patienten an.

Im Jahr 2015 publizierten Zitvogel und ihre Mitarbeiter Ergebnisse, wonach krebskranke Mäuse, die in steriler (also mikrobenfreier) Umgebung leben, auf die Behandlung mit einem Immuncheckpoint-Inhibitor nicht ansprechen. Besser wirkt die Therapie demnach bei Nagern, die mit *Bacteroides fragilis* besiedelt sind. Andere Forscher machten ähnliche Beobachtungen. Thomas Gajewski beispielsweise, Krebsmediziner an der University of Chicago in Illinois, berichtete, dass Bifidobakterien die Wirkung einer Krebsimmuntherapie bei Mäusen verstärken. Diese Mikroben gehören zur normalen Darmflora und fördern die körpereigene Abwehrreaktion gegen Tumorzellen.

Die Onkologin Jennifer Wargo erfuhr von diesen Ergebnissen bei einem wissenschaftlichen Meeting 2014. Zurück am MD Anderson Cancer Center begann sie sofort damit, Stuhlproben von Hautkrebspatienten zu sammeln, die an ihrem Krankenhaus eine Immuntherapie erhalten sollten. Im November 2017 veröffentlichten sie, Gajewski und Zitvogel ihre gesammelten und übereinstimmenden Ergebnisse im Fachblatt »Science«, wonach Immuntherapien besser bei Patienten wirken, in deren Darmflora bestimmte Bakterienstämme vertreten sind. Die vielen Stuhlproben, die Routy in den Pariser Kliniken gesammelt hatte, halfen Zitvogels Team auch nachzuweisen, dass Krebskranke, die mit Antibiotika behandelt worden sind, tendenziell schlechter auf Immuntherapien ansprechen.

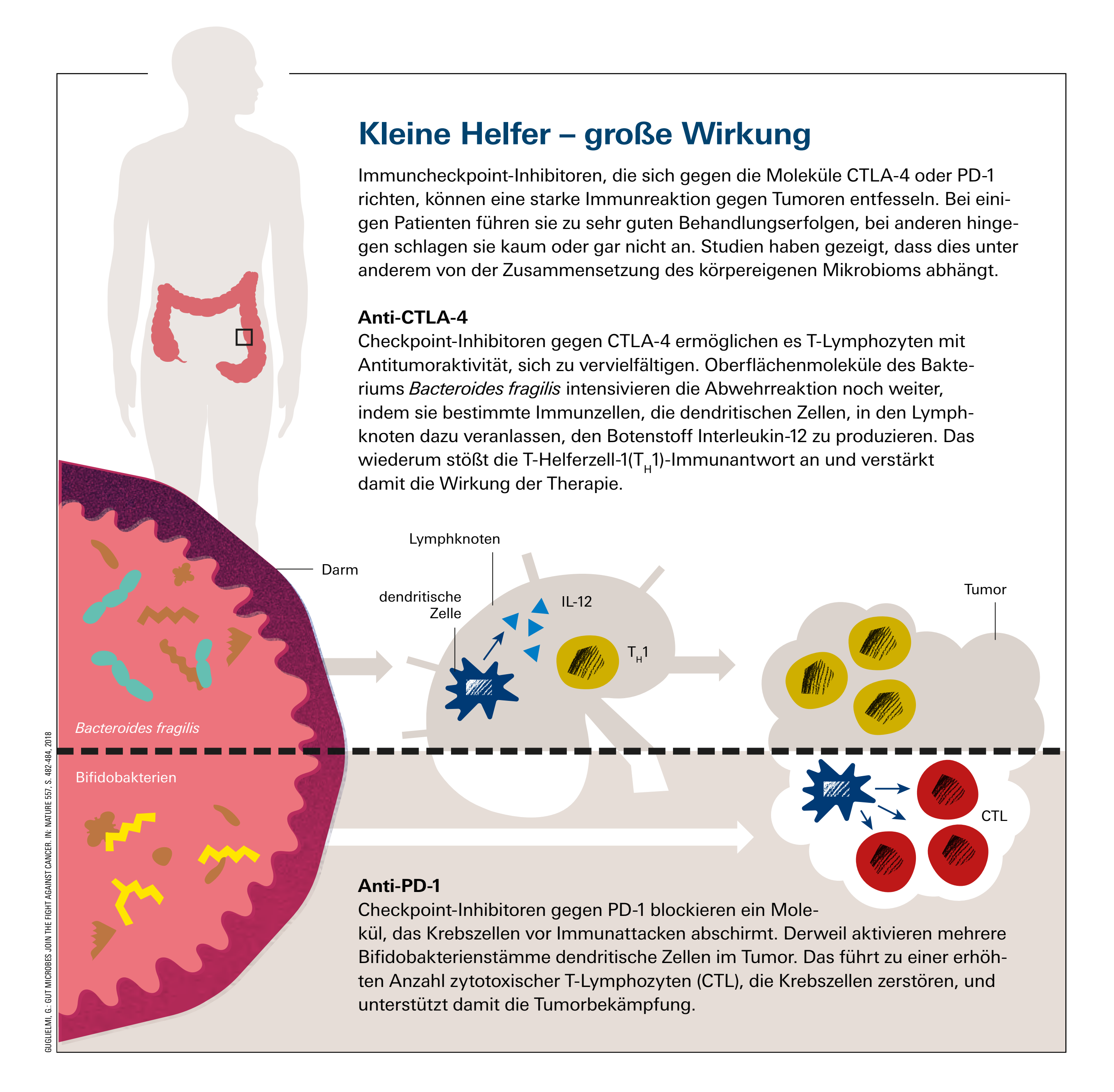
Um diesen Zusammenhang weiter zu untersuchen, übertrugen die Forscher Bakterien aus dem Darm menschlicher Patienten in den Verdauungsapparat von Mäusen, die an vergleichbaren Krebserkrankungen litten. Erhielten die Tiere Bakterienstämme von Patienten, bei denen die Behandlung einen guten Erfolg gehabt hatte, ließ die Gabe von Immuncheckpoint-Inhibitoren ihre Tumoren stärker schrumpfen als bei Nagern, deren menschliche Mikrobiomspender nicht von der Behandlung profitiert hatten. »Diese Ergebnisse sind höchst interessant«, betont Neeraj Surana, Mikrobiologin am Boston Children's Hospital, »sie eröffnen die Möglichkeit, die neuen Erkenntnisse zur Rolle des Mikrobioms therapeutisch anzuwenden.«

Einige Wissenschaftler betreiben bereits entsprechende klinische Studien. Hassane Zarour, Immunologe an der University of Pittsburgh, arbeitet dabei mit dem Pharmaunternehmen Merck zusammen. Sein Team sammelt Darmbakterien von Krebskranken, bei denen die Behandlung mit einem Immuncheckpoint-Inhibitor angeschlagen hat, und überträgt sie in den Verdauungstrakt von Melanompatienten, bei denen diese Therapie bislang wirkungslos geblieben ist. Die Technik wird Transplantation des intestinalen Mikrobioms genannt, und Merck hat rund eine Million US-Dollar in die Studie investiert.

Umzug von einem Organismus in einen anderen

Wargo ist in eine ähnliche Untersuchung involviert. Zusammen mit dem Parker Institute for Cancer Immunotherapy in San Francisco und dem Biotechnologie-Unternehmen Seres Therapeutics in Cambridge (Massachusetts) wird sie prüfen, ob die Übertragung von Darmbakterien das Mikrobiom von Krebspatienten so verändern kann, dass eine Immuntherapie besser wirkt.

Die Transplantation des intestinalen Mikrobioms ist bei einigen anderen Erkrankungen bereits ein bewährtes Verfahren. Im Februar dieses Jahres beispielsweise empfahl die Infectious Diseases Society of America (Amerikanische Gesellschaft für Infektionskrankheiten), damit Darminfektionen zu behandeln, die vom bakteriellen Erreger *Clostridium difficile* verursacht sind und sich mit anderen Methoden nicht zurückdrängen lassen. Doch der Mikrobentransfer birgt auch Risiken. Damit die Patienten nicht unbeabsichtigt mit gefährlichen Keimen infiziert werden, sind aufwändige Untersuchungen der Spender und des zu übertragenden Präparats erforderlich.



Kleine Helfer – große Wirkung

Immuncheckpoint-Inhibitoren, die sich gegen die Moleküle CTLA-4 oder PD-1 richten, können eine starke Immunreaktion gegen Tumoren entfesseln. Bei einigen Patienten führen sie zu sehr guten Behandlungserfolgen, bei anderen hingegen schlagen sie kaum oder gar nicht an. Studien haben gezeigt, dass dies unter anderem von der Zusammensetzung des körpereigenen Mikrobioms abhängt.

Anti-CTLA-4
Checkpoint-Inhibitoren gegen CTLA-4 ermöglichen es T-Lymphozyten mit Antitumoraktivität, sich zu vervielfältigen. Oberflächenmoleküle des Bakteriums *Bacteroides fragilis* intensivieren die Abwehrreaktion noch weiter, indem sie bestimmte Immunzellen, die dendritischen Zellen, in den Lymphknoten dazu veranlassen, den Botenstoff Interleukin-12 zu produzieren. Das wiederum stößt die T-Helferzell-1(T_H1)-Immunantwort an und verstärkt damit die Wirkung der Therapie.

Anti-PD-1
Checkpoint-Inhibitoren gegen PD-1 blockieren ein Molekül, das Krebszellen vor Immunattacken abschirmt. Derweil aktivieren mehrere Bifidobakterienstämme dendritische Zellen im Tumor. Das führt zu einer erhöhten Anzahl zytotoxischer T-Lymphozyten (CTL), die Krebszellen zerstören, und unterstützt damit die Tumorbekämpfung.

GUGLIELMI, G.: GUT MICROBES JOIN THE FIGHT AGAINST CANCER. IN: NATURE 557, S. 482-484, 2018

Um solche Schwierigkeiten nach Möglichkeit zu umgehen, wird Wargos Team gemeinsam mit dem Parker Institute und Seres Therapeutics zusätzlich auch oral einzunehmende Kapseln testen. Diese sollen einen Mix aus Sporen bildenden Bakterien enthalten, welche zuvor aus dem Darm erfolgreich behandelter Patienten isoliert und gereinigt wurden. Gajewski und seine Partner beim Biotech-Unternehmen Evelo Biosciences in Cambridge setzen auf die gleiche Strategie. Sie untersuchen die Wirkung von Pillen, die einzelne Bakterienstämme enthalten, auf Patienten mit verschiedenen Krebserkrankungen, darunter Darm- und Hautkrebs. Zitvogel wiederum hat das in Delaware ansässige Unternehmen EverImmune mitbegründet, das ebenfalls oral zu verabreichende Mikrobiompräparate entwickelt.

Noch ist nicht genau bekannt, auf welche Weise Bakterien mit Immuntherapien interagieren. Einer gängigen Hypothese zufolge verstärken einige Mikrobenstämme die Tumorabwehr, indem sie die Aktivierung des Immunsystems erleichtern. Doch der exakte Mechanismus bleibt rätselhaft – einschließlich der Frage, welche Bakterien welche Immunzellen modulieren. Die Forscher hoffen, dass die klinischen Studien helfen werden, dies aufzuklären. Wargo und ihre Mitarbeiter beispielsweise nehmen bakterielle Stoffwechselprodukte in den Blick. Sie halten es für möglich, in Stuhl- und Blutproben von Krebskranken, bei denen die Therapie gut anschlägt, spezifische Spuren solcher Substanzen zu finden. Auch die jeweiligen Anzahlen verschiedener Immunzelltypen in Blut und Tumorgewebe könnten Aufschluss über die beteiligten Mechanismen geben.

Gajewski spekuliert, die Bakterien könnten die Immunreaktion dadurch entfesseln, dass sie Zellen der Darmschleimhaut dazu anregen, bestimmte Signalmoleküle zu

produzieren. Er und sein Team untersuchen nun an Mäusen, ob Immunvorläuferzellen im Blut ihr Verhalten ändern, wenn die Tiere bestimmte Bakterien verabreicht bekommen. Zugleich versuchen die Forscher, diejenigen Bakterienstämme zu identifizieren, die dabei positive Effekte vermitteln.

Angesichts all dieser Unklarheiten befürchten einige Wissenschaftler, es könne riskant sein, entsprechende Verfahren schon jetzt an menschlichen Probanden zu testen. Unerwünschte Nebenwirkungen seien möglich, betont etwa die Mikrobiologin Neeraj Surana. Das Mikrobiom zu verändern, könnte unter Umständen weitere Gesundheitsprobleme nach sich ziehen.

Beim Übertragen von Darmbakterien gibt es noch viele Unbekannte. Bisher hat sich die Methode zumindest bei Patienten ohne Krebserkrankungen als wirksam und sicher erwiesen – jedenfalls im Großen und Ganzen, traten doch hin und wieder auch unerwartete Effekte auf. So nahm ein Teilnehmer infolge der Behandlung stark zu und wurde fettleibig. Forscher wie Wargo meinen dennoch, die Zeit sei reif für entsprechende Studien.

Seit Jahrtausenden ein massenhaft verzehrter Bestandteil von Milchprodukten

Gajewski, der mit Bifidobakterien arbeitet, sieht gute Gründe, zuversichtlich zu sein: »Diese Mikroben sind schon seit Jahrtausenden Bestandteil von Milchprodukten und werden in großen Mengen verzehrt.« Im Kindes- und Jugendalter gehörten sie zur normalen Bakteriengesellschaft des Verdauungstrakts; bis zum Erwachsenenalter nehme ihre Besiedelungsdichte allmählich ab. Das Verabreichen von Bifidobakterien sollte daher, falls nicht nützlich, so doch zumindest unbedenklich sein.

Wargos, Gajewskis und Zitvogels gemeinsam in »Science« publizierte Ergebnisse zeigen, dass sich besonders günstige Behandlungsverläufe bei ganz verschiedenen Zusammensetzungen des Mikrobioms einstellen können – selbst bei ein und derselben Krebsart und Therapieform. Allerdings haben die Forscher dabei Krebspatienten aus Frankreich und den USA untersucht. Dass sich von Patientengruppe zu Patientengruppe jeweils verschiedene Bakterien als nützlich erwiesen, könnte also an unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten gelegen haben. Doch auch Variationen in der Methode der Probengewinnung, in der Datenanalyse und der statistischen Methodik hätten die Ergebnisse möglicherweise beeinflusst, sagt Joël Doré, Biologe am französischen Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) in Paris. Er war 2011 daran beteiligt, das Projekt International Human Microbiome Standards (IHMS) ins Leben zu rufen, das die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen in der Mikrobiomforschung verbessern soll.

Laut Hanage kann es sogar innerhalb eines Landes und bei Patienten derselben Tumorart vorkommen, dass verschiedene Studien jeweils andere Mikrobenstämme ergeben, die mit günstigen Therapieverläufen einhergehen. Erst wenn die Forscher herausgefunden hätten, worauf diese Abweichungen zurückzuführen seien, ließen sich auch die Ergebnisse der Untersuchungen richtig interpretieren, betont der Epidemiologe. Klinische Studien mit gezielten Mikrobiomveränderungen seien erst dann wirklich sinnvoll, wenn die verschiedenen Arbeitsgruppen die Ergebnisse der jeweils anderen reproduzieren könnten und sich untereinander auf einen Satz »vorteilhafter« Mikroorganismen geeinigt hätten.

Das Problem mangelnder Reproduzierbarkeit ist in der Mikrobiomforschung altbekannt. »Viele Studienergebnisse lassen sich entweder nicht bestätigen, oder die damit verbundenen Sachverhalte erweisen sich als erheblich komplexer als zunächst angenommen«, berichtet Hanage. Standards, wie sie das IHMS-Projekt entwickeln soll, könnten hier Abhilfe schaffen. Doch werden die Wissenschaftler sie voraussichtlich nur widerwillig in ihre Arbeit integrieren, gibt Susan Erdman zu bedenken, die als Mikrobiologin und Onkologin am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (Massachusetts) tätig ist. Erdman befürchtet, die Standardisierung könnte Innovation verhindern, denn gerade das Experimentieren mit verschiedenen Randbedingungen führe zu neuen Entdeckungen.

Wargo zufolge sollten wenigstens die Methoden der Probengewinnung und Datenanalyse standardisiert werden – und auch die Verfahren, um die Therapiewirkung an größeren Patientengruppen zu bestätigen. Seit dem zurückliegenden Jahr haben sie und ihr Team Stuhlproben von mehr als 500 Hautkrebspatienten analysiert, die verschiedene Behandlungen durchlaufen hatten. Gemeinsam mit Kollegen in Paris untersuchen sie nun solche Patienten, die eine Kombination aus zwei Immuntherapien erhalten haben, um herauszufinden, welche Darmbakterien ein Ansprechen auf dieses Doppelverfahren begünstigen.

Forscher wie Wargo hoffen, die Analyse der Darmflora könnte künftig voraussagen helfen, welcher Patient von welcher Behandlung profitieren wird. Die Zusammensetzung des Mikrobioms würde dann als Biomarker genutzt. Bis es so weit ist, müssen die Wissenschaftler allerdings noch viel mehr Proben sammeln. Dieses Mal werden gewiss nicht so viele Ärzte ihre Witze darüber machen, prophezeit Routy: »In der Krebsmedizin sind Darmbakterien von unbeachteten zu höchst interessanten Organismen aufgestiegen. Nun müssen sie dieser Erwartung freilich gerecht werden.« ◂

www.nature.com
Nature 557, S. 482–484, 2018

QUELLEN

Gopalakrishnan, V. et al.: Gut Microbiome Modulates Response to Anti-PD-1 Immunotherapy in Melanoma Patients. In: Science 359, S. 97–103, 2018

Matson, V. et al.: The Commensal Microbiome Is Associated with Anti-PD-1 Efficacy in Metastatic Melanoma Patients. In: Science 359, S. 104–108, 2018

Routy, B. et al.: Gut Microbiome Influences Efficacy of PD-1-Based Immunotherapy Against Epithelial Tumors. In: Science 359, S. 91–97, 2018

Sharma, P. et al.: Primary, Adaptive, and Acquired Resistance to Cancer Immunotherapy. In: Cell 168, S. 707–723, 2017

UMWELT

GOLDRAUSCH IN DER TIEFSEE

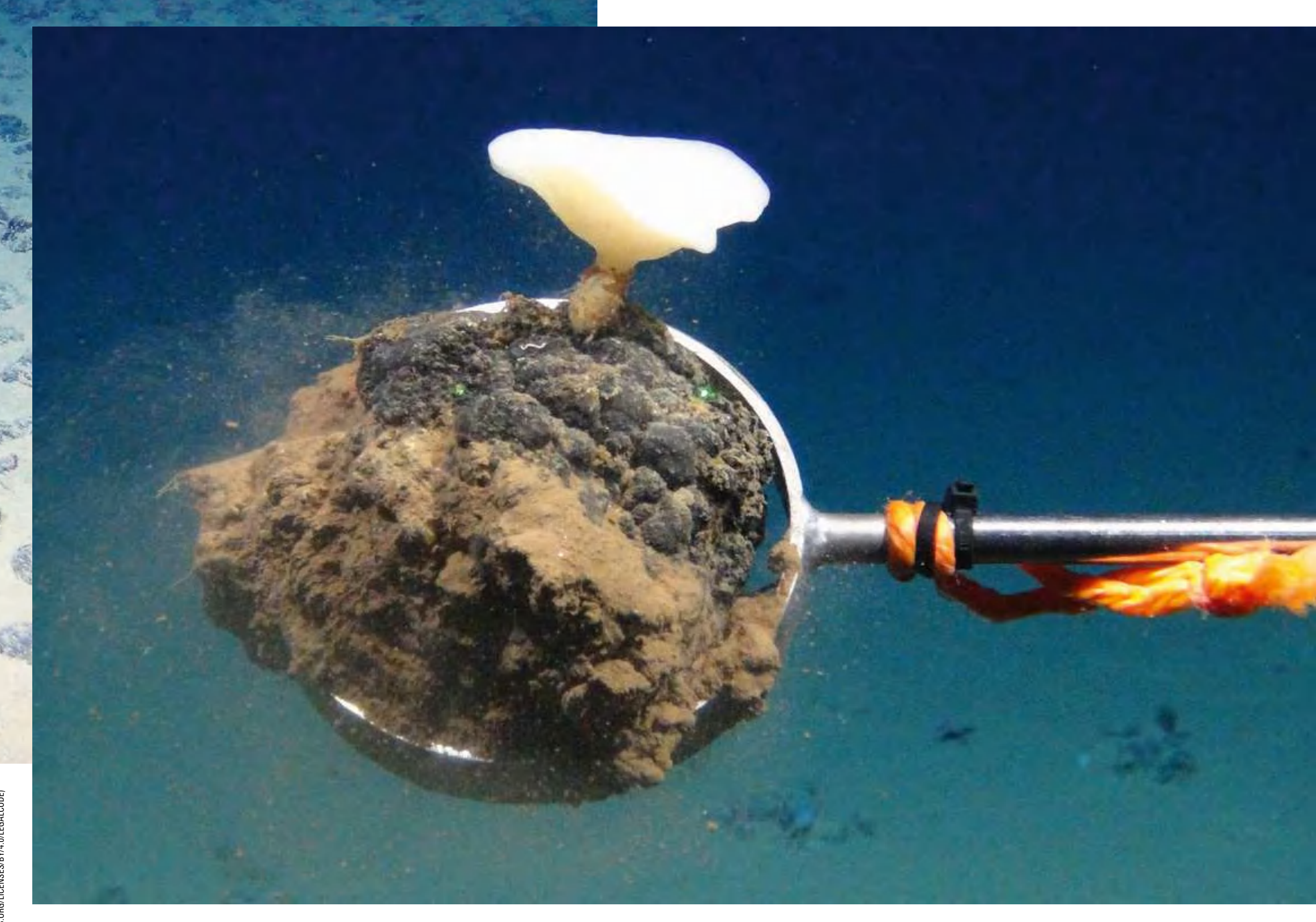
Das Rennen um die Ausbeutung und den Schutz des Meeresbodens ist eröffnet. Wie lassen sich Umweltschäden minimieren?




Thomas Peacock (links) ist Professor für Maschinenbau und Direktor des Environmental Dynamics Laboratory am Massachussets Institute of Technology in Cambridge, USA. **Matthew H. Alford** ist Professor für physikalische Meereskunde und stellvertretender Leiter des Marine Physical Laboratory der Scripps Institution of Oceanography in San Diego, Kalifornien.

⏩ spektrum.de/artikel/1609506

Im Schlick der Tiefseeböden liegen an vielen Stellen unzählige Manganknollen, so wie in dieser Ebene im zentralen Pazifik (links). Sie enthalten begehrte Metalle wie Nickel, Kupfer und Kobalt, sind zugleich aber wichtiger Lebensraum für viele Organismen (unten).



Es ist Ende Februar, und wir befinden uns 50 Kilometer vor der Küste San Diegos. Das Meer ist hier 1000 Meter tief. An Deck des Forschungsschiffs Sally Ride stehen acht Container – jeder davon so groß wie ein Kleinwagen –, die mit Sediment vom Grund des Pazifischen Ozeans gefüllt sind. Am Vormittag hatten wir das Sediment mit Seewasser vermischt und anschließend den gesamten Inhalt durch einen großen Schlauch, der rund 60 Meter unter die Meeresoberfläche reichte, über Bord gepumpt.

Sechs Stunden lang verfolgten wir die Partikelwolke, die sich mit der Strömung vom Schiff weg und in die Tiefe hinab ausbreitete. Mit Hilfe einer Reihe von Sensoren konnten wir die äußere Form der Wolke sowie die Sedimentkonzentration bestimmen, bis das Signal zu schwach wurde. Ziel war es, Daten über ein dringliches Thema zu gewinnen, das den Ozean schon bald stark beeinflussen könnte: Rohstoffförderung am Meeresboden. Nach jahrelangem Abwägen fangen Staaten und private Firmen nun an, den Grund der Ozeane nach wertvollen Mineralen abzusuchen, vor allem nach Nickel, Kupfer und Kobalt. Ablagerungen, die diese Metalle enthalten, findet man unter anderem als faustgroße Gesteinsknollen in mehreren tausend Meter Tiefe. Die Vision: Unterwasserfahrzeuge so groß wie Mähdrescher sollen den Meeresboden abfahren und die obere Sedimentschicht mitsamt der darin enthaltenen Knollen einsaugen. Das eingesammelte Material würden diese dann über kilometerlange Schläuche auf Schiffe an der Oberfläche pumpen, welche die begehrten Minerale aussieben und das übrige Sediment wieder zurück ins Meer leiten würden.

Welche Folgen hätten diese Aktivitäten für die Organismen am Meeresgrund und in der Wassersäule darüber? Unser Test mit der Partikelwolke war ein erster Schritt, das zu beantworten.

Die globale Nachfrage nach Metallen nimmt unaufhörlich zu, und einige Minen an Land, in denen man Erze mit

einem hohen Metallanteil findet, sind allmählich erschöpft. Unternehmen wie Global Sea Mineral Ressources und UK Seabed Ressources hegen daher Ambitionen, Rohstoffe zukünftig in der Tiefsee zu fördern. Das könnte ihrer Meinung nach ökonomischer sein, als an Land immer minderwertigere Erze mit immer größerem Aufwand aus dem Boden zu holen.

Länder wie Japan und Südkorea, die über keine nennenswerten Bodenschätze verfügen, wollen die zum Teil gewaltigen Vorkommen im Ozean ebenfalls erschließen. Im September 2017 führte die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation einen der ersten größeren kommerziellen Tests durch: Nahe Okinawa sammelte sie mit Hilfe eines Unterwasserbaggers mehrere Tonnen Zink und andere Metalle in 1600 Meter Tiefe. Das Fördergebiet liegt innerhalb der 200-Seemeilen-Zone Japans, der so genannten ausschließlichen Wirtschaftszone. Kleine südpazifische Inselstaaten ohne eigene Rohstoffindustrie wie Tonga und die Cook-Inseln erwägen, innerhalb ihrer Hoheitsgewässer Schürfrechte an ausländische Investoren zu vergeben. Und die Internationale Meeresbodenbehörde, die kommerzielle Aktivitäten in internationalen Gewässern reguliert, hat bereits 28 Lizenzen an Einrichtungen aus 20 Ländern zur Erkundung von Mineralen am Grund des Ozeans erteilt.

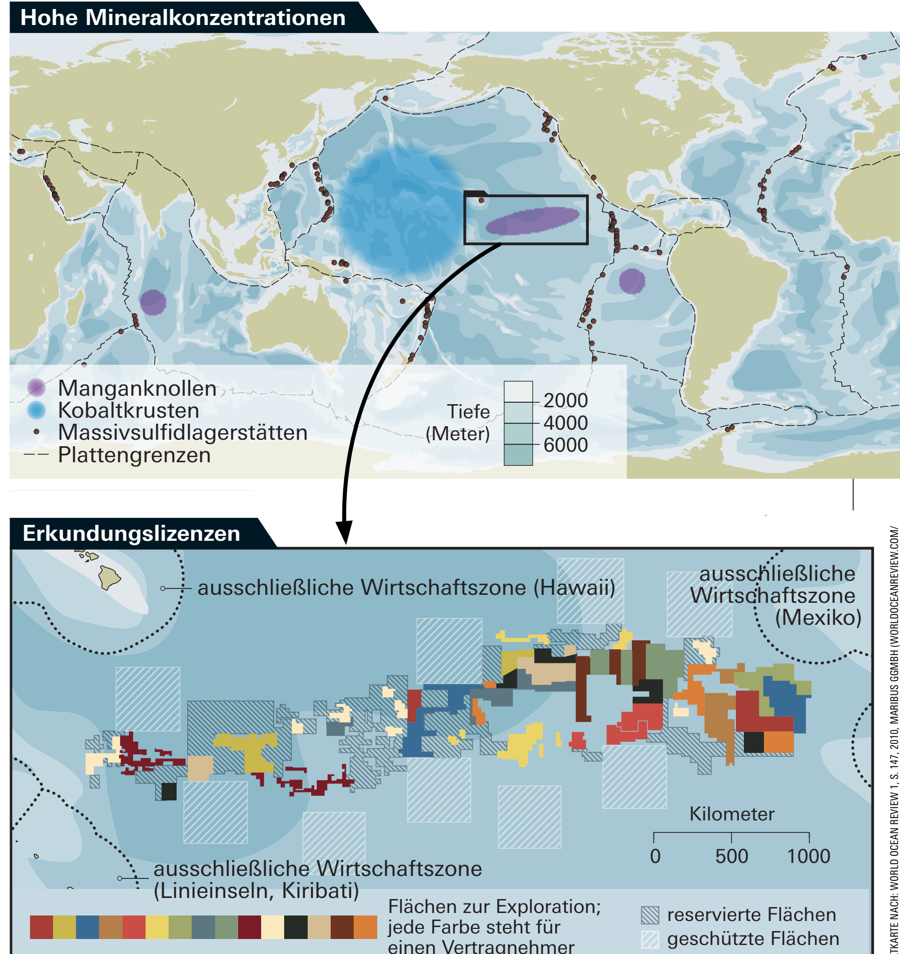
Gleichzeitig versuchen Forscher zu verstehen, welche Schäden Tiefseebergbau anrichten würde und wie man diese minimieren könnte. Dabei kooperieren sie mit Regierungen, Industrieunternehmen, der Internationalen Meeresbodenbehörde, Universitäten und Wissenschaftsorganisationen und führen beispielsweise gemeinsame Untersuchungen wie die unsere durch. Anders als in der Geschichte von Öl, Kohle oder Phosphat hat die Forschergemeinde bei der Rohstoffförderung im Ozean die Gelegenheit, gemeinsam mit allen Beteiligten bereits Vorsichtsmaßnahmen zu erarbeiten, bevor eine bedeutende Tiefseebergbauindustrie überhaupt entsteht.

Vor rund 150 Jahren entdeckten schwedische Forscher erstmals in der Karasee – einem Randmeer der Arktis nördlich von Russland – Lagerstätten am Meeresgrund. Die britische Challenger-Expedition, die in den 1870er Jahren

Auf Schatzsuche

Zahlreiche Staaten und Unternehmen fördern Öl, Sand oder Diamanten in flachen Meeresregionen. Nun suchen sie am Grund der Tiefsee nach wertvollen Metallen wie Nickel und Kobalt. Forscher haben in internationalen Gewässern drei Arten von Rohstoffvorkommen identifiziert. Manganknollen sind vermutlich die, deren Abbau am profitabelsten wäre.

Die Internationale Meeresbodenbehörde reguliert Fördervorhaben außerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone der Küstenstaaten. Für die Clarion-Clipperton-Zone, eine Region am Grund des Pazifiks von der Größe Europas, hat sie 16 Lizenzen zur Erkundung von Lagerstätten erteilt. Der Großteil der Erze liegt in mehr als 4000 Meter Tiefe. Wenn die Behörde eine Genehmigung ausstellt, reserviert sie eine gleich große Fläche für ein Entwicklungsland. Zudem weist sie Schutzzonen aus, in denen die Rohstoffförderung verboten ist. Einige Länder suchen auch innerhalb ihrer Hoheitsgewässer nach Erzen am Meeres-



DOLLY HOLMES, WELTKARTE NACH: WORLD OCEAN REVIEW 1, S. 147, 2010, MARIBUS GGMBH (WORLDOCEANREVIEW.COM/WOR-1); DARUNTER NACH: INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY MIT DATEN VON CLAUS S., DE HAUWERE N., VANHOORNE B., SOUZA DIAS F., OSET GARCÍA P., SCHEPERS L., HERNANDEZ F., AND MEES J. (FLANDERS MARINE INSTITUTE), ACCESSED AT WWW.MARINEREGIONS.ORG ON NOVEMBER 24, 2016 / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2018

den Grundstein für die moderne Ozeanografie legte, bestätigte den Fund kurze Zeit später. In den 1970er Jahren führte die US-amerikanische CIA eine aufwändige Geheimaktion durch, bei der die vermeintliche Erkundung eines Manganknollenfelds im Pazifik von der Bergung des russischen U-Boots K-129 ablenken sollte (die nur zum Teil gelang). Lange verhinderten die großen technischen Herausforderungen und niedrige Preise aber einen kommerziellen Abbau.

Im vergangenen Jahrzehnt ist das Interesse an den Ressourcen der Tiefsee jedoch deutlich gestiegen: Die wachsende Weltbevölkerung, Urbanisierung, zunehmender Konsum und die Entwicklung immer neuer Technologien, die abhängig sind von bestimmten Metallen, lassen hier inzwischen ein lukratives Geschäft erwarten. Zum Beispiel schätzen Experten, dass die globale Nachfrage nach Nickel von heute rund zwei Millionen Tonnen pro Jahr bis 2030 auf drei Millionen klettern wird. An Land gibt es Reserven in Höhe von etwa 76 Millionen Tonnen. Ungefähr die gleiche Menge liegt am Meeresboden innerhalb der Clarion-Clipperton-Zone, einer Tiefseeebene, die sich zwischen Hawaii und dem mexikanischen Bundesstaat Baja California erstreckt. Ähnliches gilt für Kobalt. Die terrestrischen Reserven von etwa sieben Millionen Tonnen werden von kobalthaltigen Knollen in der Clarion-Clipperton-Zone vermutlich sogar übertroffen (siehe **Spektrum** Juli 2018, S. 46).

Reiche Lagerstätten – schwer zu erschließen und in einzigartigen Lebensräumen

Drei Typen von Ablagerungen kommen für eine kommerzielle Nutzung in Frage: Der erste umfasst aktive wie auch inaktive Hydrothermalquellen, die an den Nahtstellen der ozeanischen Platten heißes Material ausspeien. Diese so genannten Massivsulfidlagerstätten enthalten – neben Schwefel – Metalle wie Kupfer, Zink, Blei und Gold in hoher Konzentration. Papua Neuguinea hat mit der kanadischen Firma Nautilus Minerals einen Vertrag geschlossen, der es dieser erlaubt, Sulfide an der Lagerstätte Solwara 1 in der Bismarcksee abzubauen. Die Internationale Meeresbodenbehörde hat sieben Lizenzen zur Erkundung von inaktiven Hydrothermalquellen außerhalb staatlicher Hoheitsgewässer vergeben. Wissenschaftler fordern ein Moratorium für aktive heiße Quellen in der Tiefsee, weil sie einzigartige Ökosysteme darstellen.

Ein weiterer Typ sind so genannte Kobaltkrusten, Niederschläge von im Meerwasser gelösten Metallen, die sich auf den felsigen Gipfeln und an den Flanken von Seebergen bilden. Die Krusten wachsen extrem langsam, nur wenige Millimeter in einer Million Jahre, und erreichen typischerweise eine Dicke von fünf bis zehn Zentimetern. Außer Kobalt enthalten sie auch Nickel sowie andere begehrte Metalle. Zwar wurden vier Lizenzen für die Exploration untermeerischer Berge im Westpazifik erteilt. Doch der Abbau von Kobaltkrusten ist besonders schwierig, da sich das Erz nur mit großem Aufwand vom darunterliegenden Gestein lösen lässt – zumal in steilem, nur schwer passierbarem Gelände.

Die meisten Fördervorhaben konzentrieren sich auf so genannte polymetallische Manganknollen, die weitflächig am Grund des Ozeans verstreut liegen und teilweise von Sediment bedeckt sind. Die Knollen entstehen, indem sich Metalle um einen geeigneten Kristallisationskeim ablagern. Das kann ein Sandkorn, die Schale eines winziges Einzellers oder ein Haizahn sein. Nach einer Million Jahre ist so eine rund ein Zentimeter dicke Schicht gewachsen.

Die Internationale Meeresbodenbehörde hat 16 Genehmigungen erteilt, die Förderung von Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone zu sondieren, unter anderem an die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Die mineralische Zusammensetzung der Gesteinsbrocken variiert, aber im Schnitt enthalten sie etwa drei Prozent Nickel, Kupfer und Kobalt. Vor allem auf diese Metalle haben es die Lizenznehmer abgesehen. Auf Mangan entfällt rund ein Viertel des Gewichts, weshalb ein Abbau der Erze in großem Maßstab die weltweite Verfügbarkeit an Mangan erheblich steigern würde. Die restlichen Anteile sind ökonomisch uninteressant.

Es dauert Monate, mögliche Abbauregionen zu erkunden. Zum Einsatz kommen dabei Schiffe, die den Meeresboden kartieren und mit Hilfe von Kastengreifern Sedimentproben an die Oberfläche befördern. Daneben liefern autonome Unterwasserfahrzeuge Bilder vom Grund. Weil es sich um derart große Flächen handelt, nimmt man Stichproben und extrapoliert diese. Eine Lagerstätte gilt als rentabel, wenn die Dichte an Manganknollen mehr als zehn Kilogramm pro Quadratmeter beträgt und die Erze nicht oder kaum mit Sediment bedeckt sind, so dass sie leicht aufzusammeln sind. Zudem darf das Gefälle des Meeresbodens wegen der schweren, kettenbetriebenen Erntemaschinen zehn Prozent nicht übersteigen.

Das Erntefahrzeug würde das Herzstück eines Erzabbaus in der Tiefsee bilden und über ein Kabel vom Schiff mit Strom versorgt werden. Es könnte den Grund nach einem bestimmten Raster absuchen und so vermutlich rund 50 Kilometer am Tag zurücklegen, begleitet und überwacht von autonomen Tauchrobotern. Noch in der Tiefe würden aus dem eingesammelten Material die Knollen grob heraus-

AUF EINEN BLICK
MINEN AM MEERESBODEN

1 Die Nachfrage nach einigen Metallen nimmt zu. Gleichzeitig gehen einige leicht zugängliche Reserven an Land zur Neige. Daher wollen Staaten und Unternehmen auch am Grund des Ozeans schürfen.

2 In bestimmten Regionen der Tiefsee liegen faustgroße Manganknollen, die reich an Nickel, Kupfer und Kobalt sind. Maschinen könnten sie abbauen, würden aber große Mengen Sediment aufwirbeln.

3 Internationale Organisationen, Wissenschaftler und Industrie müssen Wege finden, die Rohstoffförderung in der Tiefsee möglichst schonend zu gestalten und die empfindliche Fauna am Meeresboden zu schützen.

gesiebt und die wertlosen Sedimente mehrheitlich wieder ausgeworfen werden. Ein Schlauch mit einer Reihe von Pumpen – eine Steigleitung, wie sie auch in der Öl- und Gasindustrie sowie beim Ausbaggern von Gewässern zum Einsatz kommt – würde dann den noch verbliebenen Schlamm zum Schiff hochbefördern. Dort würde man die Erzklumpen von sämtlichem Sediment trennen und Letzteres wieder zurück ins Meer leiten. Große Frachtschiffe könnten das Gestein zur Extraktion der Metalle an Land transportieren.

Studien zur Wirtschaftlichkeit des Tiefseebergbaus beziffern die Menge an Manganknollen, die Unternehmen jährlich fördern müssten, um profitabel zu sein, auf drei Millionen Tonnen. Das entspricht ungefähr 37 000 Tonnen Nickel, 32 000 Tonnen Kupfer, 6000 Tonnen Kobalt und 750 000 Tonnen Mangan.

1994 trat das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen in Kraft, das alle Unterzeichnerstaaten verpflichtet, Maßnahmen zum Schutz der Ozeane zu ergreifen. Im Zuge des Abkommens wurde die Internationale Meeresbodenbehörde gegründet. Diese vergibt Lizenzen für 150 000 Quadratkilometer große Gebiete zur Exploration von Rohstoffen in der Tiefsee. Weil der Meeresboden in internationalen Gewässern als gemeinsames Erbe der Menschheit gilt, müssen sich Unternehmen oder Organisationen, die dort Erze abbauen wollen, einen Sponsor suchen, der das Seerechtsübereinkommen unterzeichnet hat (aktuell 167 Staaten sowie die Europäische Union). Wenn die Erkundung abgeschlossen ist, muss das Unternehmen sein Gebiet in zwei gleich große Areale aufteilen. Die Internationale Meeresbodenbehörde entscheidet dann, welche Hälfte es ausbeuten darf. Die andere reserviert sie für ein Entwicklungsland.

Konsequenzen für das Leben unter Wasser

Knapp ein Siebtel der so zugeteilten 75 000 Quadratkilometer sind laut Studien mit einer hohen Wahrscheinlichkeit rentabel. Auf dieser Fläche würde das Erntefahrzeug die obere Sedimentschicht - zirka 10 bis 15 Zentimeter – abtragen und den Meeresgrund verdichten. Eine Vielzahl mikroskopischer sowie größerer Lebensformen besiedeln die Knollenfelder und würden das wohl nicht überleben.

Unklar ist auch, welche Konsequenzen die Rohstoffförderung für noch kleinere Mikroorganismen wie Bakterien hätte. Sie würden mit dem Sediment hochgeschleudert und viele Kilometer von ihrem eigentlichen Habitat entfernt landen. Solche, die auf die Manganknollen als Substrat angewiesen sind, würden vermutlich eingehen. Weil sich die Knollen über Jahrmillionen bilden und weil sich Tiefseeökosysteme abgesehen von Hydrothermalquellen nur äußerst langsam entwickeln, ist nicht davon auszugehen, dass sich Abbaugebiete in einem für Menschen relevanten Zeitraum erholen würden. Vor rund 30 Jahren haben deutsche Forscher im Perubecken in 4100 Meter Tiefe mit einem Schlitten das Umpflügen eines Manganknollenfelds simuliert. Als eine Expedition 2015 die Stelle erneut besuchte, sahen die Spuren des schweren Geräts ganz frisch aus.

Wissenschaftlern bereitet vor allem das aufgewirbelte Sediment Sorgen. Schwache Strömungen im tiefen Ozean, die sich mit einigen Zentimetern pro Sekunde fortbewegen, könnten Partikel viele Kilometer weit tragen. Mit einem Durchmesser von rund 20 Mikrometern ist das Sediment überwiegend sehr fein und sinkt entsprechend langsam (etwa einen Millimeter pro Sekunde). Angenommen ein Erntefahrzeug erzeugt eine Staubwolke, die zehn Meter über den Grund reicht. Dann würden sich die Partikel noch in zehn Kilometer Entfernung absetzen und zahlreiche Tiefseebewohner ersticken. Denn die sind es gewohnt, dass extrem wenig Material ihren Lebensraum erreicht: Bis sich ein Millimeter Sediment angehäuft hat, vergehen normalerweise rund 1000 Jahre.

Wie der von Schiffen zurück ins Meer gepumpte Schlamm die Ökologie des Ozeans beeinträchtigen könnte, ist deutlich schwerer abzuschätzen. Nahe der Oberfläche herrschen stärkere Strömungen und Turbulenzen. Möglicherweise würde man das Sediment über einen mehrere hundert Meter in die Tiefe reichenden Schlauch zurückleiten und so eine riesige Partikelwolke erzeugen. Das feine Material würde von der Strömung verteilt und allmählich verdünnt werden und am Tag einige Kilometer zurücklegen. Bei unserem Experiment vor San Diego haben wir die Sedimentfahne mit verschiedenen Instrumenten verfolgt: Strömungen verzerrten die anfänglich konische Wolke, und es bildeten sich ineinander verschlun-



Manganknollen wachsen extrem langsam. Es dauert viele Jahrmillionen, bis sich unter den besonderen geochemischen Bedingungen der Tiefsee Metalle zu einem kartoffelgroßen Gebilde zusammenlagern.



FOTO: BRETT STEVENS

gene Arme. Derzeit analysieren wir die Partikelkonzentrationen in Schiffsnähe sowie in größerer Entfernung dazu.

Andere Forscher versuchen in der Zwischenzeit zu bestimmen, inwiefern der Verlust von Leben in den Abbaugebieten sowohl lokale biologische Prozesse beeinflussen würde als auch die in angrenzenden Tiefseeregionen. In der Clarion-Clipperton-Zone hat die Internationale Meeresbodenbehörde neun große Schutzgebiete ausgewiesen und erarbeitet aktuell Richtlinien für die Einrichtung von Schutzzonen innerhalb der lizensierten Areale. Experten sollen diese überwachen.

Bei der Diskussion um die Förderung mineralischer Ressourcen aus der Tiefsee gilt es, die Vor- und Nachteile gegenüber terrestrischen Minen abzuwägen. In der Demokratischen Republik Kongo etwa – die zirka 60 Prozent der weltweiten Kobaltnachfrage befriedigt – sorgt der Rohstoffabbau für Entwaldung sowie Wasser- und Luftverschmutzung. Zudem arbeiten auch Kinder in den Minen. In anderen Ländern gehen die leicht zugänglichen Nickelvorkommen zur Neige, so dass Firmen für die gleiche Fördermenge mehr Energie und Chemikalien aufwenden müssen, was die Umwelt stärker belastet.

Effektiver Umweltschutz braucht internationale Regelwerke

Die Extraktion der Metalle aus den Manganknollen würde für die terrestrische Umwelt ebenfalls nicht ohne Folgen bleiben. Denn rund 70 Prozent der Knollen sind wertloses Gestein, das entsorgt werden muss. An Land leitet man die Förderschlamme oft einfach in die Löcher, die der Erzabbau hinterlässt. Den Schlamm, der beim Verarbeiten von Millionen von Manganknollen anfallen würde, könnte man nicht einfach ins Meer pumpen. Einen Vorteil hätte Bergbau in der Tiefsee jedoch gegenüber jenem an Land: Die notwendige Infrastruktur – Schiffe, Erntefahrzeuge und Tauchroboter – könnte problemlos von einer erschöpften Lagerstätte zur nächsten weiterziehen.

Welche Form der Rohstoffförderung größeren Schaden anrichtet, ist schwer zu beurteilen. Um die Ausbeutung der Ressourcen am Grund des Ozeans und die damit einhergehenden Umweltbelastungen zu minimieren, sind effektive globale Recyclingprogramme unabdingbar – auch wenn Wiederverwertung allein den steigenden Bedarf an Kobalt, Nickel und Co. nicht abdecken kann. Zudem braucht es verbindliche Standards für den Erzabbau. Die Internationale Meeresbodenbehörde hat keine eigenen Schiffe, um die Einhaltung von Umweltauflagen zu kontrollieren, weshalb Sponsornationen diese Aufgabe übernehmen. Sollte die Behörde zu dem Schluss kommen, dass ein Minenbetreiber die Standards nicht erfüllt, könnte sie dem Land oder dem Unternehmen die Schürfrechte entziehen. Allerdings haben 14 UNO-Mitgliedstaaten das Seerechtsübereinkommen zwar unterzeichnet, aber nicht ratifiziert – allen voran die USA. Weitere 15 haben es nicht unterschrieben. Diese Länder könnten versuchen, in internationalen Gewässern Rohstoffe zu fördern und das Übereinkommen zu ignorieren. Das wäre dann eine Angelegenheit für die Weltpolitik.

Die Internationale Meeresbodenbehörde hat den ersten Entwurf eines Regelwerks vorgelegt. Es legt die Kriterien fest, nach denen die Organisation die Erkundung und Ausbeutung von Lagerstätten gestattet oder versagt sowie die Verpflichtungen der Lizenznehmer und Schutzmaßnahmen für das marine Ökosystem. Die Regularien sollen 2020 in Kraft treten.

Auch innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszonen der Küstenstaaten, die mehr als ein Drittel des Ozeans ausmachen, gibt es Bestrebungen, Erze am Meeresgrund abzubauen. Vor allem im Pazifik, wo die Hoheitsgewässer vieler Inselstaaten große Tiefen erreichen.

Einige Länder, zum Beispiel der Inselstaat Palau, haben sich gegen die Erschließung von Minen im Meer ausgesprochen. Andere wie Tonga, Kiribati und die Cook-Inseln entwicklen eigene Regularien für Kooperationen mit dem Ausland. So haben etwa die Cook-Inseln einen Vertrag mit Ocean Minerals abgeschlossen, der dem US-Unternehmen ein Vorzugsrecht bei der Erkundung eines 23 000 Quadratkilometer großen Gebiets nach kobaltreichen Manganknollen einräumt.

All diese Bestrebungen zeigen, dass Tiefseebergbau schon bald Realität werden könnte. Angesichts des wachsenden ökonomischen sowie strategischen Interesses werden einige Nationen vielleicht in weniger als zehn Jahren anfangen, testweise Rohstoffe vom Meeresgrund an die Oberfläche zu befördern. Japan tut dies bereits heute innerhalb der 200-Seemeilen-Zone. Staatliche Behörden sollten mit Akteuren aus Industrie und Wissenschaft zusammenarbeiten und ein Regelwerk erstellen, das den Schutz des Ozeans sicherstellt, bevor die Goldgräberstimmung in der Tiefsee richtig einsetzt. ◂

QUELLEN

Boetius, A, Haeckel, M.: Mind the Seafloor. In: Science 359, S. 34–36, 2018

Danavaro, R. et al.: An Ecosystem-Based Deep-Ocean Strategy. In: Science 335, S. 452–454, 2017

International Seabed Authority: Biodiversity, Species Ranges, and Gene Flow in the Abyssal Pacific Nodule Province: Predicting and Managing the Impacts of Deep Seabed Mining. ISA Technical Study No. 3, Kingston 2008

Petersen, S. et al.: News from the Seabed – Geological Characteristics and Resource Potential of Deep-Sea Mineral Resources. In: Marine Policy 70, S. 175–187, 2016

Vanreusel, A. et al.: Threatened by Mining, Polymetallic Nodules are Required to Preserve Abyssal Epifauna. In: Scientific Reports 6, 26808, 2016

INTERVIEW

»WIR MÜSSEN KLIMAINTERVENTIONEN ERPROBEN«

Die Meere speichern einen Großteil der CO_2-Emissionen und puffern so die Erderwärmung ab. Doch dadurch übersäuern die Ozeane. Der Meeresbiologe Ulf Riebesell diskutiert Möglichkeiten zur Eindämmung des Klimawandels durch Geoengineering.

spektrum.de/artikel/1609508

Herr Professor Riebesell, im Juli 1992 haben Sie als Postdoktorand am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven einen Artikel zum Defizit in der globalen Kohlenstoffbilanz für Spektrum geschrieben. 40 Prozent der Kohlenstoffdioxid-Aufnahme konnte man damals nicht erklären …
…und 26 Jahre später ist immer noch unklar, wo der Kohlenstoff bleibt. Laut aktuellen Zahlen des Global Carbon Project setzt die Menschheit durch das Verbrennen von Öl, Gas und Kohle sowie durch Landnutzungsänderungen knapp 40 Gigatonnen Kohlenstoffdioxid (CO_2) pro Jahr frei. Etwas weniger als die Hälfte davon gelangt in die Atmosphäre, wie präzise Messungen rund um den Erdball zeigen. Für den Ozean ist die Datenbasis weniger umfangreich, aber wir schätzen, dass hier etwa ein Viertel landet. Der Verbleib von etwas weniger als 30 Prozent bleibt weiterhin ungelöst.

SERIE
Große Forscher im Gespräch



Teil 1: November 2018
Elizabeth Blackburn

Teil 2: Dezember 2018
Gerardus 't Hooft

Teil 3: Januar 2019
Ulf Riebesell

Teil 4: Februar 2019
Frank Anthony Wilczek

Teil 5: März 2019
Martin Edward Hellman

Teil 6: April 2019
Erwin Neher und Bert Sakmann

Vermutlich fungiert die terrestrische Biosphäre als zusätzliche CO_2-Senke?
Das nehmen Forscher allgemein an. Bis vor einigen Jahren gingen sie davon aus, dass die borealen Nadelwälder, die fast zehn Prozent der Erdoberfläche bedecken, das CO_2 aufnehmen. Inzwischen hat man eher die Tropen und Subtropen in Verdacht, also jene Regionen, in denen besonders stark abgeholzt wird. Man stochert bei der Beantwortung der Frage allerdings noch ein wenig im Nebel. Mit Sicherheit können wir sagen, dass es eine biologische Senke ist. Das zeigen sehr präzise Analysen des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Sauerstoff. Es gibt ein Sauerstoffsignal, das nur durch Fotosynthese erzeugt werden kann und exakt dem Defizit in der CO_2-Bilanz entspricht. Ob allerdings Landpflanzen dieses Signal erzeugen oder ein Teil des »fehlenden« Kohlenstoffs im Meer verschwindet, verraten uns die Messwerte nicht.

Ist es denkbar, dass man die CO_2-Fixierung durch Phytoplankton und den anschließenden Export von organischem Material in die Tiefsee – die so genannte biologische Kohlenstoffpumpe – unterschätzt?
Ja, durchaus. Wie viel Biomasse die Tiefen der Meere erreicht, ist nur schwer zu bestimmen. Die Unsicherheit aktueller Schätzungen beträgt 30 bis 40 Prozent. Und in den frühen 1990er Jahren war die Datenbasis wesentlich dünner. Insofern ist eine etwaige Zu- oder Abnahme der biologischen Pumpe in diesem Zeitraum kaum zu ermitteln.



PAT SCHEIDEMANN

Biomasse umwandeln. Ob der Nettoeffekt für den globalen Ozean positiv oder negativ ist, können wir auf Grund der lückenhaften Daten im Moment nicht sagen.

Seit Beginn Ihrer Forscherkarriere beschäftigen Sie sich intensiv mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Meer. In der Öffentlichkeit war das vor knapp 30 Jahren noch kein Thema, oder?
Nein, überhaupt nicht. Aber auch wir Wissenschaftler haben etwa das Problem der Ozeanversauerung ziemlich spät erkannt. Erst Anfang der 2000er Jahre kam der Gedanke auf, dass durch mehr CO_2 im Wasser nicht nur der pH-Wert sinkt, es also saurer wird, sondern möglicherweise dadurch auch Kalk bildende Organismen beeinträchtigt werden. 2004 debattierten Forscher auf einer Konferenz in Paris, ob man im Meer zusätzliches CO_2 verklappen könnte, um die Atmosphäre zu entlasten. Anhand der wenigen damals vorliegenden Studien erkannte man schnell: Das Meer nimmt bereits einen Großteil der CO_2-Emissionen auf, und die damit verbundene Ozeanversauerung hat unerwünschte Folgen. Was bis dahin bestenfalls ein Nischenthema war, wird inzwischen weltweit erforscht. Und wenn man heute die Menschen auf der Straße danach fragen würde, hätten sicher viele schon mal von dem Phänomen gehört.

Ulf Riebesell
(* 15. 10. 1959)
ist Professor für Biologische Ozeanographie am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Sein Forschungsinteresse gilt den Auswirkungen des Klimawandels (Erwärmung, Versauerung und Sauerstoffverlust) auf Stoffkreisläufe und Organismen sowie den Folgen gezielter Eingriffe in das Ökosystem Meer durch Geoengineering. 2012 wurde ihm für seine Arbeit der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis verliehen, der mit 2,5 Millionen Euro am höchsten dotierte deutsche Förderpreis für herausragende Wissenschaftler.

In einem weiteren Artikel für Spektrum sind Sie im Oktober 1993 der Frage nachgegangen, ob Mikroalgen (Phytoplankton) bei steigender CO_2-Konzentration besser wachsen und so womöglich die Erderwärmung abbremsen. Damals haben Sie davor gewarnt, den CO_2-Düngeeffekt zu überschätzen. Gilt das noch immer?
Die im Ozean weit verbreiteten Diatomeen oder Kieselalgen werden kaum zum Wachstum angeregt werden, weil sie CO_2 ohnehin sehr effizient in die Zelle aufnehmen. Andere Mikroalgen hingegen profitieren von einem höheren CO_2-Gehalt. Phytoplankton benötigt jedoch auch Nährstoffe wie Stickstoff, der die Primärproduktion im Meer in der Regel begrenzt. Das heißt, schnelleres Algenwachstum durch CO_2-Düngung nützt nur dann, wenn die Zellen mehr Kohlenstoff pro Stickstoff fixieren. Einige Arten tun das tatsächlich bei erhöhten CO_2-Konzentrationen und Temperaturen – während andere sogar weniger Kohlenstoff pro Stickstoff in

Wenn man um die Jahrtausendwende die Diskussion in den Medien verfolgte, schien es noch nicht ausgemacht, dass der Klimawandel stattfindet, geschweige denn, dass der Mensch diesen verursacht. Herrscht darüber heute Konsens?
Unter Wissenschaftlern absolut. Als ich 2003 das Alfred-Wegener-Institut verließ, gab es dort noch namhafte Forscher, die anzweifelten, ob die CO_2-Zunahme in der Atmosphäre menschengemacht ist. Heute wird kein ernst zu nehmender Experte mehr behaupten, dass natürliche Prozesse dafür verantwortlich sind. Damit würde man sich lächerlich machen in der Forschergemeinde.

Schwerpunkt Ihrer Forschung ist der marine Kohlenstoffkreislauf. Was genau untersuchen Sie, und auf welche Methoden stützen Sie sich dabei?
Meine Arbeitsgruppe hat sich bislang vor allem drei globalen Veränderungen gewidmet: Erwärmung, Versauerung und Sauerstoffabnahme. Unser Hauptaugenmerk galt dabei der Basis des Nahrungsnetzes, also dem Phytoplankton. In den letzten Jahren haben wir vermehrt ganze Lebensgemeinschaften untersucht, in so genannten Mesokosmen. Mit diesen 55000 Liter fassenden, schwimmenden Reagenzgläsern sind wir um die ganze Welt gereist, mittlerweile waren wir damit an sieben Standorten. Darin studieren wir verschiedene Ebenen der Nahrungskette – von Bakterien über Mikroalgen und Zooplankton bis hin zu kleinen Fischen. Wir wollen nicht nur deren Physiologie verstehen, dafür eignen sich auch Laborversuche mit isolierten Arten sehr gut. Aber Laborergebnisse sind selten eins zu eins auf natürliche Gemeinschaften übertragbar. Uns interessiert, wie sich bestimmte Umweltveränderungen auf das Nahrungsnetz und den Kohlenstoffexport in tiefere Schichten auswirken.

In Ihren Versuchen simulieren Sie den Ozean der Zukunft, in 50 bis 100 Jahren. Inwiefern sind die Ergebnisse dieser Experimente auf die Umwelt übertragbar? So ändert sich etwa der CO_2-Gehalt in den Mesokosmen rund 500- bis 1000-mal schneller als in der realen Welt. Bedeutet das nicht großen Stress für die Organismen?
Den Stress können wir vermeiden, indem wir die CO_2-Konzentration im Meerwasser nicht schlagartig erhöhen, sondern über einen Zeitraum von mehreren Tagen allmählich anheben. Phytoplankton hat typischerweise eine Generationszeit von einem Tag. Die Versauerung findet also über mehrere Generationen statt. Wir können daher davon ausgehen, dass die beobachteten Reaktionen nicht auf Stress im Sinn einer plötzlichen Umweltveränderung zurückzuführen sind. Das wissen wir auch aus Laborexperimenten. Der andere Kritikpunkt ist berechtigt: Wir messen in der Regel eine akklimatisierte Reaktion – vergleichbar mit der Erhöhung der Anzahl roter Blutkörperchen, wenn man sich lange in großer Höhe aufhält – jedoch keine Anpassung im evolutionären Sinn. Dafür sind die Versuchszeiträume meist zu kurz. Evolutionäre Anpassung benötigt wenigstens 100 Generationen, das konnten wir in einer Langzeitstudie mit der Kalkalge *Emiliana huxleyi* feststellen.


PAT SCHEIDEMANN

Forscher Ulf Riebesell (links) diskutiert mit Wissenschaftsjournalist Tim Kalvelage an Bord des Forschungsschiffs Alkor über die Zukunft der Meere.

Sie haben vorhin angedeutet, Ihren Forschungsschwerpunkt zukünftig zu verlagern?
Irgendwann stellt man fest, dass gut zehn Jahre bis zur Pensionierung bleiben, und fragt sich: Was würde ich in der Zeit gern bewegen? Auf welchem Gebiet möchte ich noch einen Beitrag leisten? Die Klimaforscherin Corinne Le Quéré hat mich inspiriert, eine neue Richtung einzuschlagen. Sie hielt meinen Kollegen und mir im Rahmen eines Vortrags einmal vor: Ihr seid die Warner und kündigt immer schlimme Dinge an. Aber das lähme die Gesellschaft. Die Leute würden abstumpfen, weil sie ständig schlechte Nachrichten hörten und das Gefühl hätten, ohnehin nichts ändern zu können. Und da habe ich für mich gedacht, dass sie Recht hat. Daher versuche ich nun Gelder einzuwerben, um mögliche Lösungsansätze zu erforschen.

Nachrichten rund um das Meer sind tatsächlich oft deprimierend: Überfischung, Korallensterben, Todeszonen, Müllteppiche ... Ist man da als Forscher auch bisweilen frustriert, wenn man wie Sie über 25 Jahre den dramatischen Wandel im Ozean dokumentiert, ohne dass sich signifikante Verbesserungen abzeichnen?
An Motivation, die Ursachen und Folgen von Versauerung, Erwärmung oder Sauerstoffmangel weiterhin zu ergründen, mangelt es mir nicht, falls Sie das meinen. Auf diesen Feldern gibt es noch viel zu lernen. Aber trotz zahlreicher offener Detailfragen ist das Grundproblem klar: Wir müssen die CO_2-Emissionen drastisch reduzieren, um die negativen Konsequenzen für den Ozean zu begrenzen. Der Entschluss, mich in Zukunft anderen Themen stärker zu widmen, ist angetrieben von dem Wunsch, diese Probleme zu bewältigen. Wissenschaftler drängen seit zwei Jahrzehnten erfolglos auf einen geringeren CO_2-Ausstoß, unsere CO_2-Ziele und das tatsächlich Erreichte klaffen weit auseinander. Welche zusätzlichen Optionen haben wir also, den Klimawandel und andere Umweltveränderungen in den Griff zu bekommen? Im Pariser Klimaabkommen hat die Staatengemeinschaft vereinbart, eine globale Erwärmung von über zwei Grad nicht zu tolerieren und idealerweise ein halbes Grad unter dieser Obergrenze zu bleiben. Die meisten Szenarien des Weltklimarats (IPCC) beinhalten jedoch so genannte negative CO_2-Emissionen, um dieses Ziel zu erreichen. Das heißt, wir müssen CO_2 entweder technisch abscheiden und verflüssigen, um es anschließend unterirdisch lagern zu können, oder mit biologischen Maßnahmen, zum Beispiel durch Aufforstung, aus der Atmosphäre entfernen.

Der Europäische Forschungsrat hat Ihnen kürzlich 1,5 Millionen Euro bewilligt, um herauszufinden, ob sich die Produktivität der Meere durch künstlichen Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser erhöhen lässt. Was steckt hinter dem Vorhaben?
Neben der Erderwärmung gibt es eine weitere große Herausforderung für die Menschheit im 21. Jahrhundert: die Nahrungsmittelversorgung von bald zehn oder elf Milliarden Menschen. Wie sollen wir auf der gleichen oder – wenn wir Wälder zum Schutz des Klimas ausweiten wollen – gar einer schwindenden Anbaufläche drei bis vier Milliarden zusätzlich ernähren? Entweder wir müssen uns alle vegetarisch ernähren oder wir schaffen neue Nahrungsquellen. An Land ist das Potenzial größtenteils ausgereizt. Bleibt also der Ozean. Der hat gegenüber der terrestrischen Biosphäre zwei große Vorteile: Es herrscht nie Mangel an Wasser, und es gibt Nährstoffe im Überfluss – zumindest unterhalb von 50 bis 200 Metern. Man muss lediglich die Nährstoffe dorthin bekommen, wo das Phytoplankton wächst. In den Tropen und Subtropen gibt es große »ozeanische Wüsten«. Diese nährstoffarmen Meeresgebiete bedecken etwa 40 Prozent der Erdoberfläche. Mit Hilfe von Offshore-Wind-

kraftanlagen oder Fotovoltaik könnte man das nährstoffreiche Tiefenwasser CO_2-neutral an die Oberfläche befördern, wo es genügend Licht für Fotosynthese betreibende Einzeller gibt. Dabei interessiert uns folgende Frage: Führt das dadurch angeregte Algenwachstum zu Nahrungsnetzen, die ähnlich produktiv und effizient sind wie jene in den natürlichen Auftriebsgebieten, etwa vor der Küste von Mauretanien oder Peru? Auftriebsgebiete machen nur etwa zwei Prozent der Meeresfläche aus, liefern aber 25 Prozent des globalen Fischereiertrags.

Ließe sich auf diese Weise auch die biologische Kohlenstoffpumpe ankurbeln?
Das dachte man anfangs, als die Idee aufkam. Aber das Tiefenwasser ist nicht nur reich an Nährstoffen, sondern auch an CO_2. Netto würde die zusätzliche CO_2-Aufnahme durch absinkende Biomasse wohl nur gering ausfallen.

Zu den oft als Geoengineering bezeichneten Klimainterventionen zählen auch Vorschläge zur Abkühlung der Erde durch Eingriffe in den Strahlungshaushalt (Solar Radiation Management) …
… die dem Meer nicht helfen werden, weil sie das Problem der Ozeanversauerung nicht lösen. Das CO_2 bliebe ja in der Atmosphäre.

Befürworter halten dem entgegen: Indem wir Schwefelaerosole in der Atmosphäre versprühen, die das Sonnenlicht reflektieren, könnten wir uns Zeit verschaffen – um geeignete Maßnahmen zu entwickeln, den CO_2-Gehalt in der Atmosphäre zu senken.
Aber wie sollte das in der Praxis aussehen? Idealerweise würde auf UN-Ebene über solche Maßnahmen entschieden. Angesichts der Schwäche der Vereinten Nationen scheint ein solches Szenario allerdings wenig realistisch. Dass das Pariser Klimaabkommen zu Stande gekommen ist, gleicht einem Wunder. Vermutlich würden Nationen das also selbst in die Hand nehmen. Das könnte unvorhersehbare Folgen für benachbarte Regionen haben. Man stelle sich vor, Indien würde Schwefelaerosole über seinem Territorium ausbringen und in Bangladesch oder Pakistan käme es in der Folge zu Dürren und Ernteausfällen. Daraus könnten schnell internationale Konflikte entstehen.

Ist das nicht ein grundsätzliches Problem bei Klimainterventionen? Wer entscheidet, wo und in welchem Umfang in das System Erde eingegriffen wird? Wir könnten mit Hilfe von Geoengineering so lange am Thermostat des Planeten drehen, bis wieder vorindustrielle Temperaturen herrschen.
In Paris hat sich die Staatengemeinschaft darauf verständigt, zwei Grad Erwärmung nicht zu überschreiten. Das ist das Ziel. Gerade sieht es so aus, als würden wir deutlich darüber hinausschießen. Wir sind also weit davon entfernt, über ambitioniertere Klimaziele diskutieren zu können. Im Gegenteil, wir müssen alles tun, um möglichst nahe an die Zwei-Grad-Marke zu kommen. Weil jedes zehntel Grad mehr eine Katastrophe wäre. Man denke etwa an die Flüchtlingsströme, die unsere Demokratien schon jetzt belasten.

Es kursieren drei Ideen, die CO_2-Aufnahme der Meere zu erhöhen: durch künstlichen Auftrieb, so genannte Ozeanalkalisierung und Eisendüngung. Nur Letztere wurde bisher erprobt – mit scheinbar mäßigem Erfolg. Beim letzten Eisendüngeexperiment LOHAFEX im Jahr 2009 gab es für die Forscher zudem medialen Gegenwind, Umweltorganisationen wie Greenpeace protestierten gegen die Durchführung, und das Bundesumweltministerium stoppte die Expedition zeitweise. Wird dieser Ansatz weiterhin verfolgt?

Das Thema ist völlig verbrannt. Weder in Europa noch in Nordamerika gibt es dafür noch Forschungsgelder. Das ist bedauerlich, denn die Zugabe von Eisen hat Potenzial. 11 der 13 durchgeführten Versuche dieser Art haben gezeigt, dass man durch Zugabe des Mikronährstoffs in bestimmten Regionen das Wachstum von Diatomeen anregen kann. Diese Algen sind schwer und sinken schnell, können Kohlenstoff also effizient in die Tiefsee exportieren. Tatsächlich konnte allerdings keine der Studien nachweisen, dass Eisendüngung die Speicherung von CO_2 im Ozean verstärkt – dafür waren diese Experimente aber auch viel zu kurz und die Testgebiete zu klein. Man müsste eine deut-lich größere Fläche über einen längeren Zeitraum düngen, um die notwendigen Daten zu erhalten.

Glauben Sie nach den Erfahrungen aus LOHAFEX, dass man die Menschen für noch größere Eingriffe in den Ozean gewinnen kann?
Ja, weil wir solche Maßnahmen erforschen müssen. In 15 bis 20 Jahren wird der Druck auf die Politik, etwas gegen die Auswirkungen des Klimawandels zu unternehmen, vermutlich so groß sein, dass sie auf Klimainterventionen zurückgreifen muss. Und die Entscheidung, welche der Maßnahmen dann zum Einsatz kommen oder ob die damit verbundenen Risiken unvertretbar sind, sollte auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren und nicht auf einem Bauchgefühl. Diese zu liefern, sehe ich als Verantwortung der Wissenschaft. Der Bevölkerung gegenüber sollten wir offen kommunizieren, dass wir Klimainterventionen in Betracht ziehen und erproben müssen. Das sehen auch die meisten Forscher so – wenngleich viele Bedenken haben, was die Anwendbarkeit betrifft. ◂

Das Interview führte **Tim Kalvelage**, promovierter Biogeochemiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
KUNST TRIFFT CHEMIE: RADIERUNGEN

Radieren ist ein 500 Jahre altes Druckverfahren, das auch schon berühmte Künstler der Renaissance nutzten. In der Herstellung der Druckplatten steckt eine ganze Menge Chemie.




Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

spektrum.de/artikel/1609510



Rembrandts Radierung »Drei Kreuze« (1653) enthält nuancenreiche Schattierungen. Derartige Effekte gelangen dem Künstler durch mehrfaches Ätzen einer Metallplatte.

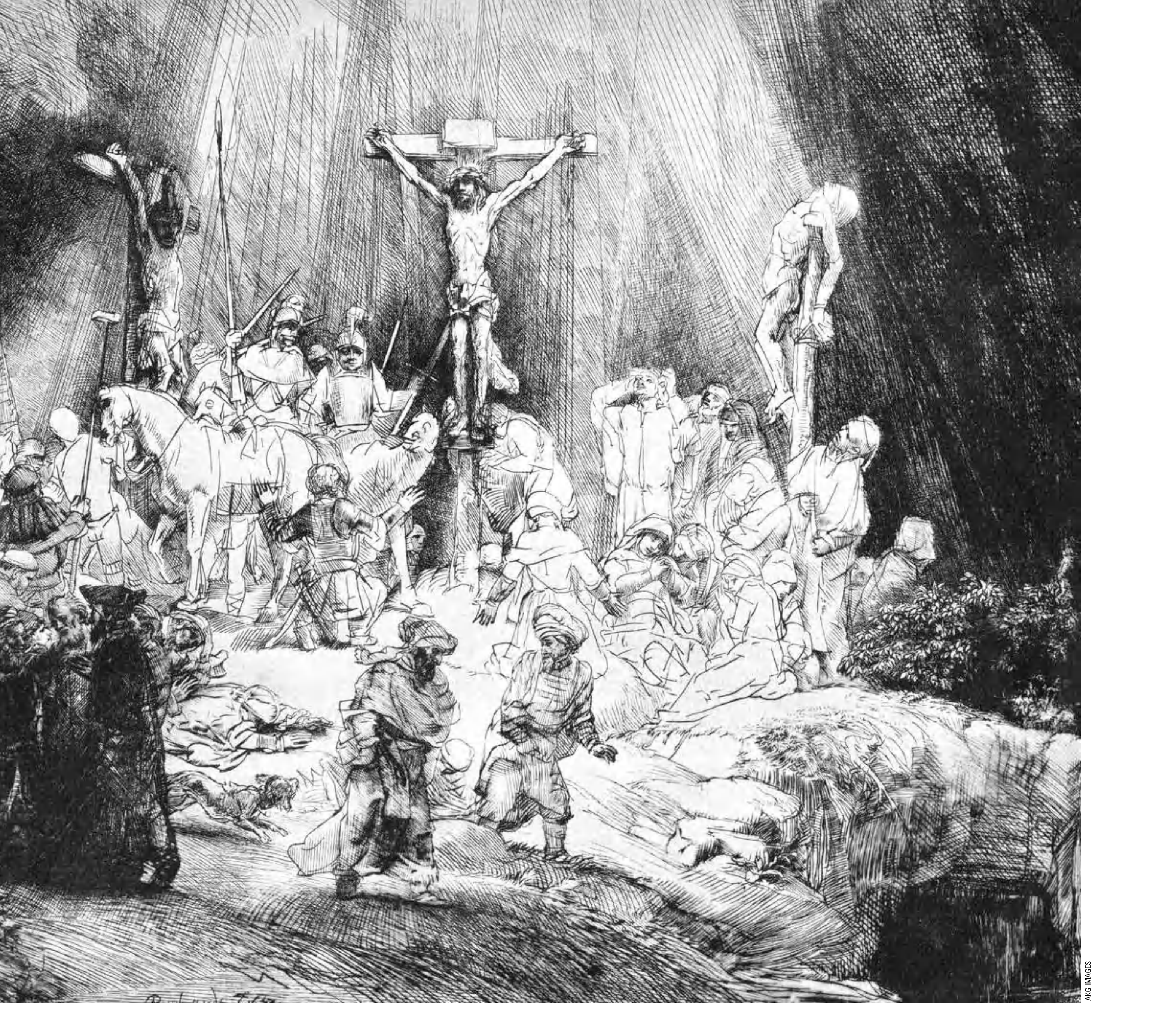
Mitte des 15. Jahrhunderts erfand Johannes Gutenberg den modernen Buchdruck. Wenige Jahrzehnte später eroberte ein neues Druckverfahren die Kunstszene: die Radierung (lateinisch radere = kratzen, entfernen).

Das Prinzip besteht darin, dass zunächst eine Lackschicht (Ätzgrund genannt) auf eine Kupferplatte aufgetragen wird. Danach ritzt der Künstler mit einem spitzen Griffel gezielt in den Lack. In den Anfängen der Radierung wurde Asphaltlack, Wachs oder Pech verwendet. Der Künstler hat alle Freiheiten und kann verschiedenartigste Linien hineinkratzen oder ganze Flächen von der Lackschicht befreien. Der Clou: An den frei gelegten Stellen lässt sich das Kupfer durch eine geeignete Lösung wegätzen, also auflösen. Aber unter der lackierten Schicht bleibt es geschützt. Am Ende des Ätzvorgangs steht damit ein Negativbild der Radierung. Nun muss die Kupferplatte nur noch von der Lackschicht befreit werden, und der Druck kann beginnen.

Der Künstler trägt nun auf die Platte eine Tiefdruckfarbe auf, und zwar so, dass diese sich ausschließlich in den gerade eingeätzten Rillen befindet. Im letzten Arbeitsschritt legt er ein weiches, angefeuchtetes Papier auf die Druckvorlage, das die Farbe aus den Rillen aufnimmt. Nach dem Trocknen zeigt es das Positiv des Kunstwerks.

Schon bald nach den ersten Einsätzen der Technik in der Waffenschmiede hatten berühmte Künstler wie Albrecht Dürer dieses neue Verfahren für sich entdeckt und wunderschöne Werke per Radierung hergestellt.

Ursprünglich kam diese Technik aus der Waffen- und Rüstungsschmiede, wo sie dazu diente, die Utensilien des Ritters von Welt zu verzieren – etwa durch Ornamente und Wappen. Der Schmied schwärzte die durch die Ätzung entstandenen Vertiefungen, damit sie deutlicher sichtbar waren. Als Pionier der Radierung gilt der Augsburger Schmied Daniel Hopfer. Er benutzte wahrscheinlich um das Jahr 1500 geätzte Eisenplatten für den Tiefdruck.



AKG IMAGES

Redoxsysteme zum Ätzen von Kupfer

Die Potenziale in der letzten Spalte sind ein Maß für die oxidierende Wirkung des jeweiligen Redoxsystems. Je größer der Zahlenwert, umso stärker die Oxidationskraft. Chemiker konnten in Versuchsreihen zeigen, dass es möglich ist, mit den in der Tabelle beschriebenen Redoxsystemen Kupfer zu ätzen. Aus Platzgründen beschreiben wir im Folgenden die einzelnen Experimente nicht im Detail, aber Sie finden Sie unter spektrum.de/artikel/1609510.

Oxidierte Form		reduzierte Form	Potenzial E^0 (Volt)
$Fe^{3+} + e^-$	$\longrightarrow$	Fe^{2+}	0,77
$NO_3^- + 4\,H^+ + 3\,e^-$	$\longrightarrow$	$NO + 2\,H_2O$	0,96
$O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^-$	$\longrightarrow$	$2\,H_2O$	1,23
$MnO_4^- + 8\,H^+ + 5\,e^-$	$\longrightarrow$	$Mn^{2+} + 4\,H_2O$	1,51
$H_2O_2 + 2\,H^+ + 2\,e^-$	$\xrightarrow{\text{Kat.}}$	$2\,H_2O$	1,77
$S_2O_8^{2-} + 2\,e^-$	$\longrightarrow$	$2\,SO_4^{2-}$	2,01

Radieren bis zum Kunstwerk



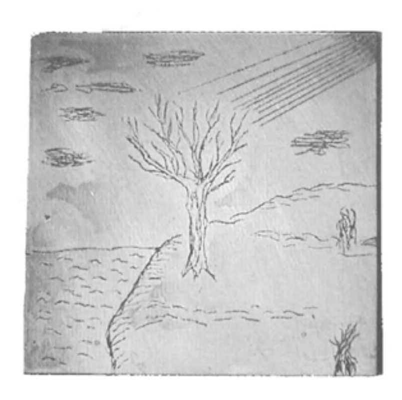
1

Auftragen der Schutzschicht



2

Einritzen des Bildes



3

Herstellen der Druckplatte durch das Ätzen und Entfernen der Lackschicht

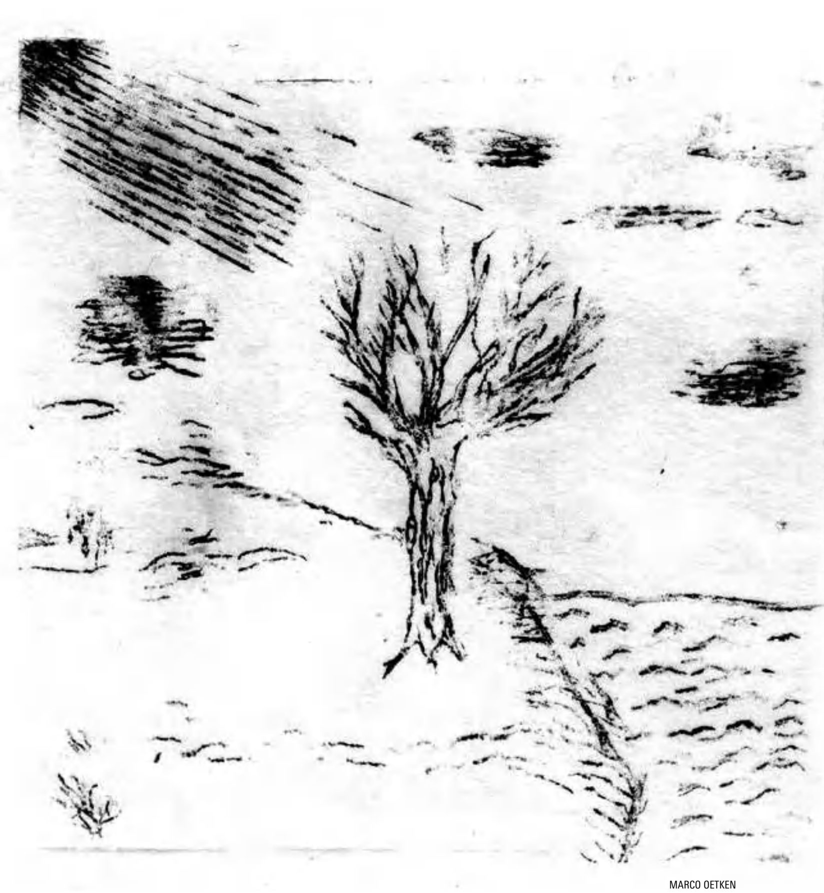
MARCO OETKEN

Albrecht Dürer setzte diese Technik zwischen 1515 und 1518 ein und stellte mehrere bedeutende Radierungen her, etwa das Bild »Christus am Ölberg« (1515). Allerdings bemerkte er schnell, dass die Druckplatten aus Eisen viel zu spröde für häufige Reproduktionen waren.

Das änderte sich, als mit der Verbreitung von Salpetersäure das Ätzen in Kupferplatten möglich wurde. Dadurch verdrängte dieses Metall Eisen als Material für Radierungen. Albrecht Altdorfer, ein Nachfolger von Dürer, begann damit, Kupferplatten in »Scheidewasser« zu ätzen, einer 60-prozentigen Salpetersäure. Das ist nicht ganz ungefährlich, weil der Künstler in hohem Maß giftigen, so genannten nitrosen Gasen ausgesetzt war. Deshalb hat sich später stattdessen das Ätzen mit Eisen-(III)-Chlorid etabliert.

Im 17. Jahrhundert entwickelte der Niederländer Rembrandt Harmenszoon van Rijn die Technik der Radierung zur Perfektion weiter. Rembrandt musste für ein solch perfektes Bild wie »Drei Kreuze« bis zu zehn Ätzvorgänge durchführen. So erreichte er unterschiedlich tiefe Rillen in der Druckvorlage und variierte damit die Farbintensität entsprechend.

Wenn Sie nun Lust bekommen haben, sich zu Hause mit einfachen Mitteln an einer Radierung zu versuchen, dann gehen Sie so vor: Zuerst bestreichen Sie eine Kupferplatine oder ein Kupferblech mit einem Pinsel einseitig mit



MARCO OETKEN

4

Ergebnis der Radierung

Permanentmarker-Farbe (gibt es in Nachfüllflaschen, etwa von Edding). Diese Lackschicht schützt die Platine gegen das Ätzbad. Alternativ können Sie die Schicht auch mit einem Permanentmarker-Filzstift auftragen. Dann ritzen Sie mit einem Griffel in die so präparierte Platte ein Bildmotiv. Im Anschluss legen Sie die Platte in eine schwefelsaure Wasserstoffperoxid-Lösung. Nach zirka 25 Minuten Reaktionszeit erhalten Sie auf diese Weise das Negativbild der Druckplatte.

Danach lösen Sie die restliche Lackschicht mit Azeton ab und tragen mit einem trockenen Lappen (zum Beispiel Küchentücher) die Tiefdruckfarbe auf. Mit einem weiteren Lappen entfernen Sie die Farbe so von der Platte, dass sie sich nur noch in den eingekratzten Rillen befindet.

Nun können Sie ein angefeuchtetes Löschpapier auf die Kupferplatte pressen. Achtung, das muss mit sehr starkem Druck, etwa durch das Gewicht eines schweren Hammers, geschehen. Trocknen lassen, abziehen – fertig ist das Bild.

Was ist beim Ätzen genau passiert? In der schwefelsauren Wasserstoffperoxid-Lösung bilden sich an den frei gelegten Stellen auf der Kupferplatine Gasblasen. Nach zirka 25 Minuten ist an diesen Stellen die Kupferschicht der Platine gänzlich verschwunden. Die Wasserstoffperoxid-Lösung hat sich auf Grund der Bildung von Kupferionen (Cu^{2+}-Ionen) bläulich verfärbt.

Elektronen auf Partnersuche

Wir haben es beim Ätzen des Kupfers mit einer Redoxreaktion zu tun, kurz für »Reduktions-Oxidations-Reaktion«. Hierbei überträgt ein Reaktionspartner (das Reduktionsmittel) Elektronen an den anderen Partner (das Oxidationsmittel). Die Elektronenabgabe nennt der Chemiker Oxidation; die Elektronenaufnahme Reduktion. Eine geeignete Kombination aus Reduktions- und Oxidationsmittel ergibt ein Redoxsystem.

Das beim Radieren von Kupfer eingesetzte Wasserstoffperoxid (H_2O_2) hat in saurer Lösung eine starke »Oxidationskraft«:

$$H_2O_2 + 2\,H_3O^+ + 2\,e^- \longrightarrow 4\,H_2O$$

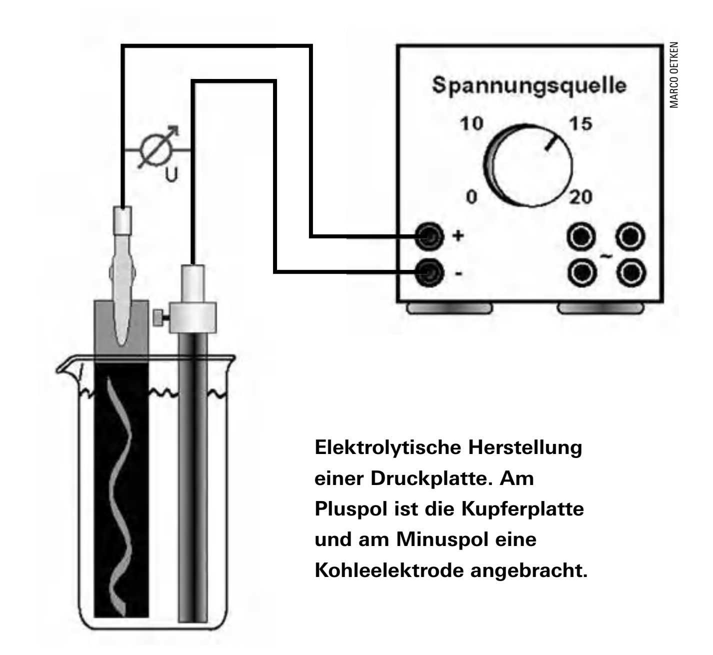
Es oxidiert das Kupfer gemäß:

$$Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2\,e^-$$

Die beobachtete Gasentwicklung in Form von Sauerstoff (O_2) resultiert aus dem Zerfall des Wasserstoffperoxids, der durch die entstehenden Kupferionen ermöglicht, also katalysiert, wird:

$$2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2$$

Künstler verwendeten für ihre Radierungen in der Regel nicht das oben genannte Wasserstoffperoxid-System, weil es damals noch unbekannt war, sondern Salpetersäure oder eine saure Eisen(III)-Chlorid-Lösung. Andere Redoxsysteme sind ebenfalls in der Lage, Kupfer zu oxidieren (siehe Tabelle »Redoxsysteme zum Ätzen von Kupfer«).



Elektrolytische Herstellung einer Druckplatte. Am Pluspol ist die Kupferplatte und am Minuspol eine Kohleelektrode angebracht.

Es geht aber auch anders. Druckplatten zum Radieren lassen sich ebenso ohne Oxidationsmittel, nämlich auf elektrolytischem Weg herstellen. Dazu werden die Kupferplatten genauso präpariert wie beim Ätzen mit Wasserstoffperoxid. Danach gibt man die Platte jedoch in ein Becherglas mit Kaliumnitratlösung, ein ungiftiger Elektrolyt mit guter Leitfähigkeit, und verbindet sie mit dem Pluspol einer Spannungsquelle. Am Minuspol hängt eine Kohleelektrode. Das Einschalten der Spannung bringt nun die Redoxreaktion durch den fließenden, elektrischen Strom in Gang. Eine Elektrolyse setzt ein. Das Ganze sollte mit fünf Volt etwa zehn Minuten lang durchgeführt werden. Schon nach kurzer Zeit verfärbt sich das Elektrolyt blau. Das liegt an den am Pluspol entstehenden Kupferionen gemäß der Reaktion:

$$Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2\,e^-$$

An der Kathode ist die Entwicklung von Wasserstoffgas (H_2) zu beobachten. Sie resultiert aus der Reduktion des Wassers:

$$2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow H_2 + 2\,OH^-$$

So erhält man ebenfalls eine qualitativ hochwertige Druckplatte.

Radierungen können heutzutage also auf vielfältige Weise hergestellt werden. Die Technik schlägt damit eine besonders schöne Brücke zwischen der Naturwissenschaft Chemie und der Kunst. ◂

QUELLEN

Betz, G.: Rembrandt: Sämtliche Radierungen in Originalgröße. Belser, Stuttgart, 4. Auflage 1986

Koschatzky, W.: Mit Nadel und Säure: fünfhundert Jahre Kunst der Radierung. Edition Tusch, Wien 1982

Stefan, A.: Redox-Reaktionen zum Anfassen. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 50, S. 43–44, 2001


SPACEJUNK3D, LLC (WWW.ESA.INT/SPACEINIMAGES/IMAGES/2013/06/SPACE_DEBRIS)

WELTRAUMSCHROTT
AUFRÄUMEN IM ALL

Immer mehr ausgemusterte Satelliten, Raketenteile und Bruchstücke von Kollisionen torpedieren den regulären Verkehr im Erdorbit. Ingenieure suchen nach Wegen, die Projektile aus den Umlaufbahnen zu räumen.



Alexandra Witze ist Journalistin in Boulder, Colorado.

spektrum.de/artikel/1609512

Seit 2010 kreist CryoSat-2 zuverlässig rund 700 Kilometer über der Erdoberfläche und überwacht das Eis auf dem Planeten. Doch am 2. Juli 2018 erkannten die Missionskontrolleure der Europäischen Weltraumorganisation ESA ein Problem – nicht mit dem Satelliten selbst, sondern von anderer Seite: Der Bahn des 140 Millionen Euro teuren Instruments näherte sich allmählich ein Stück Weltraumschrott. Die Missionskontrolleure verfolgten die Wege der Objekte und handelten, als die Gefahr einer Kollision zu groß wurde. Am 9. Juli zündete die ESA die Triebwerke von CryoSat-2 und brachte den Satelliten in eine höhere Umlaufbahn. 50 Minuten später schossen die Trümmer mit 4,1 Kilometern pro Sekunde vorbei.

Diese Art von Manövern wird von Jahr zu Jahr häufiger, da es im Weltraum um die Erde herum immer betriebsamer wird. 2017 haben kommerzielle Unternehmen, militärische und zivile Behörden sowie private Initiativen mehr als 400 Satelliten in die Umlaufbahn gebracht, viermal so viel wie im Jahresmittel von 2000 bis 2010. Noch stärker könnten die Zahlen steigen, wenn Unternehmen wie Boeing, OneWeb und SpaceX wie geplant Hunderte bis Tausende von Kommunikationssatelliten ins All schicken. Sollten die von solchen Firmen vorgeschlagenen »Megakonstellationen« umgesetzt werden, würde die Anzahl der dabei verwendeten Einzelinstrumente in etwa der Menge an Satelliten entsprechen, die bisher in der gesamten Geschichte der Raumfahrt gestartet ist.

Nach der Zerstörung eines Satelliten schießen Bruchstücke in verschiedenste Richtungen, wie in dieser Simulation dargestellt. Sie verteilen sich auf jeweils eigene Umlaufbahnen, wo sie schlimmstenfalls auf andere Objekte treffen.

Der ganze Verkehr kann zur Katastrophe führen. 2009 kollidierte ein inaktiver russischer Kosmos-Kommunikationssatellit mit einem kommerziellen US-amerikanischen Iridium-Satelliten. Dabei entstanden Tausende neuer Bruchstücke, die jetzt weitere Satelliten in der niedrigen Erdumlaufbahn in bis zu etwa 2000 Kilometer Höhe bedrohen. Insgesamt sind rund 20000 von Menschen geschaffene Objekte im Orbit bekannt, von funktionstüchtigen Satelliten über Raketenteile bis hin zu kleinen Splittern etwa von Solarzellen. Satellitenbetreiber können selbst bei rechtzeitiger Warnung nicht jeder möglichen Kollision ausweichen, da solche Manöver Zeit und Treibstoff verbrauchen, die für die Hauptaufgabe des Flugkörpers vorgesehen sind.

Die Besorgnis über Probleme durch Weltraumschrott geht bis zum Beginn der Satellitenära zurück, aber mit der Zahl der Objekte steigt der Druck auf die Forscher, Lösungen dafür zu finden. Mehrere Teams versuchen, Objekte präziser zu identifizieren und ihre Bahnen zu verfolgen, damit die Satellitenbetreiber in den immer enger werdenden Räumen effizienter arbeiten können. Neu zusammengestellte, riesige Datensätze sollen die bestmöglichen Informationen darüber enthalten, was sich wo im Orbit

AUF EINEN BLICK
GEFÄHRLICHE GESCHOSSE

1. Astronomen beobachten rund 20000 künstliche Objekte, die ungesteuert um die Erde kreisen. Jeder Zusammenstoß mit diesen Teilen produziert weitere Trümmer.
2. Solche Partikel sind eine potenzielle Gefahr für aktive Satelliten. Um Kollisionen zu vermeiden, sehen sich Missionskontrolleure immer häufiger zu Ausweichmanövern gezwungen.
3. Falls Forscher keine Strategien finden, um Weltraumschrott zu beseitigen und neu hinzukommenden zu vermeiden, könnten viele Umlaufbahnen irgendwann praktisch unbenutzbar werden.

befindet. Andere Wissenschaftler wollen aus Eigenschaften wie der Form und Größe eines Objekts schlussfolgern, woraus es genau besteht und wie sehr sich Satellitenbetreiber wirklich darum sorgen müssen. Darüber hinaus suchen die Wissenschaftler spezielle Umlaufbahnen, in die Satelliten nach Missionsende verbracht werden könnten, so dass sie möglichst schnell in der Atmosphäre verglühen.

Die Alternative zu derartigen Initiativen ist ein unvorstellbares Chaos. Bereits die Trümmerteile aus wenigen Zusammenstößen könnten eine unkontrollierbare Kaskade immer neuer Fragmente auslösen und den erdnahen Weltraum unbenutzbar machen. »Wenn wir so weitermachen, kommen wir an einen Punkt, von dem aus es kein Zurück mehr gibt«, bekräftigt Astrodynamikerin Carolin Frueh von der Purdue University in West Lafayette im US-Staat Indiana.

Weltraummüll wurde erstmals in den 1960er Jahren zum Thema in den Medien. Damals wollten die Planer eines US-Militärprojekts Millionen von kleinen Kupfernadeln in die Umlaufbahn schießen. Das sollte die Funkkommunikation sicherstellen, falls Atombombentests die Ionosphäre zerstören würden – eine atmosphärische Schicht, die Radiowellen über weite Entfernungen reflektiert. Die Air Force schickte 1961 und 1963 auch tatsächlich solche Drähtchen in den Orbit. Die meisten davon fielen in den nächsten drei Jahren von selbst zurück. Die öffentliche Diskussion um eine Verschmutzung des Weltalls führte als einer von mehreren Aspekten allerdings bald zum Ende der Versuche. Einige der Nadeln kreisen noch immer.

Seit dem Start des ersten Satelliten Sputnik 1957 ist die Zahl der Objekte im Weltraum kontinuierlich gestiegen. Sie erreichte 1970 knapp 2000, im Jahr 2000 etwa 7500 und heute rund 20000 bekannte Objekte. Die beiden größten plötzlichen Zunahmen fanden einerseits 2007 statt, als die chinesische Regierung einen ihrer eigenen Satelliten bei einem Raketentest gezielt sprengte, und andererseits 2009 bei der erwähnten Iridium-Kosmos-Kollision. Beide Ereignisse brachten Tausende neuer Fragmente hervor. Diese verantworten wiederum etwa die Hälfte der mehr als 20 Ausweichmanöver, zu denen sich die ESA jedes Jahr gezwungen sieht, sagt Holger Krag, Leiter des zuständigen »Space Debris Office« der ESA in Darmstadt.

Das US-Militär warnt jeden Tag durchschnittlich 21-mal vor möglichen Kollisionen im Weltraum. Diese Zahlen dürften 2019 noch einmal drastisch ansteigen, sobald die Air Force eine leistungsfähige neue Radaranlage auf dem Pazifikatoll Kwajalein in Betrieb nimmt. Mit ihr lassen sich auch Objekte kleiner als zehn Zentimeter erkennen – bisher die Auflösungsgrenze für eine niedrige Erdumlaufbahn. Das könnte die Anzahl der unter Beobachtung stehenden Projektile leicht verfünffachen.

Während wir immer bessere Mittel haben, Objekte im Orbit zu überwachen, nimmt weiterhin deren Gesamtzahl zu. Darum müssen Unternehmen, Regierungen und andere Akteure angesichts der gemeinsamen Bedrohung zusammenarbeiten.

Seit den 2000er Jahren haben internationale Foren wie das Inter-Agency Space Debris Coordination Committee Richtlinien für die nachhaltige Nutzung des Weltraums entwickelt. Dazu gehört beispielsweise, Explosionen von Satelliten zu verhindern, indem am Ende ihrer Nutzung Kraftstoffreste oder andere unter Druck stehende Stoffe abgelassen werden. Die Arbeitsgruppen empfehlen außerdem, die Satelliten dann immerhin so tief in die dünnen Ausläufer der Erdatmosphäre zu senken, dass sie darin innerhalb von 25 Jahren durch Reibungseffekte von selbst verglühen oder zerbrechen und niedergehen.

Im Orbit kann sich aus dem Weg gehen, wer die Wege der anderen kennt

Bisher habe sich nur etwa die Hälfte aller Missionen an die 25-Jahres-Richtlinie gehalten, kritisiert Krag. Die Betreiber der geplanten Megakonstellationen versprechen verantwortungsvoll zu handeln, aber Krag befürchtet, trotz bester Absichten könne sich das Problem verschlimmern. »Was passiert, wenn einige der Unternehmen scheitern oder pleitegehen?«, fragt er beispielsweise. »Dann werden sie wohl kaum Geld in die Hand nehmen, um noch ihre Satelliten zu entsorgen.«

Theoretisch haben die Betreiber dort oben genügend Platz für ihre Missionen, ohne jemals einem anderen Objekt nahezukommen. Einige Wissenschaftler wollen dem Problem des Weltraumschrotts darum begegnen, indem sie die vorhandenen Trümmer hochpräzise kartieren. Das würde viele Manöver unnötig machen, die heute mögliche Kollisionen vermeiden sollen. »Wenn man genau wüsste, wo alles ist, hätte man fast nie ein Problem«, bekräftigt Marlon Sorge, Spezialist für Weltraummüll bei der Aerospace Corporation, einer Beratungsorganisation in El Segundo, Kalifornien.

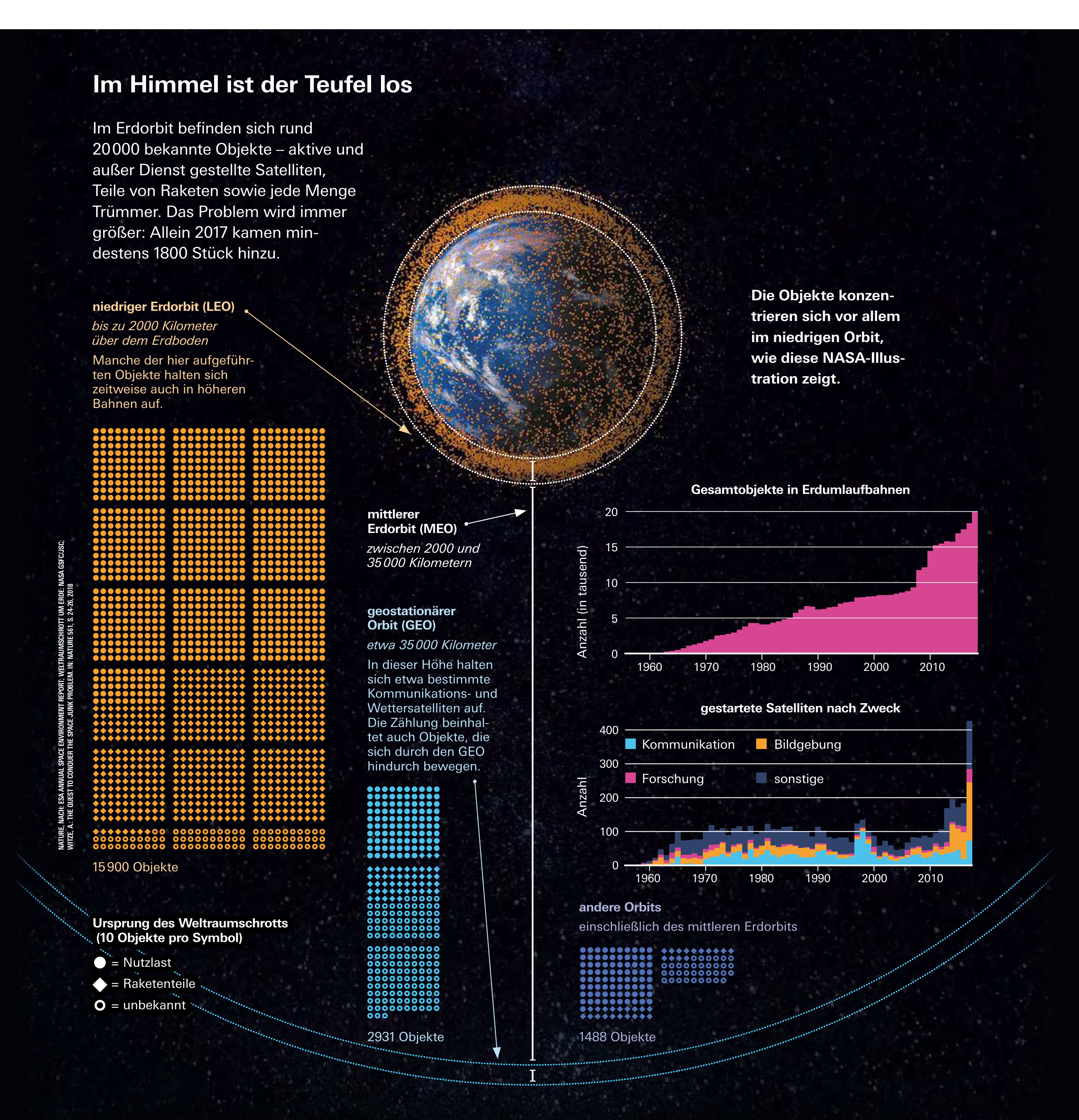
Das Feld wird als Raumverkehrsmanagement bezeichnet, analog zum Verkehrsmanagement auf der Straße oder in der Luft. Moriba Jah, Astrodynamiker an der University of Texas in Austin, vergleicht das Prinzip mit einem geschäftigen Tag am Flughafen: Flugzeuge reihen sich wie bei einer Perlenkette am Himmel aneinander, sie landen und starten in einer sorgfältig choreografierten Routine. Die Lotsen wissen den Ort der Maschinen bis auf einen Meter genau. Doch für Weltraumschrott gilt das nicht. Nicht alle Objekte im Orbit sind bekannt, und auch die in Datenbanken aufgeführten werden mit unterschiedlicher Genauigkeit verfolgt. Darüber hinaus gibt es keinen Standardkatalog, der wirklich jede Umlaufbahn genau und eindeutig führt.

Jah untermauert dieses Problem mit einer von ihm entwickelten webbasierten Datenbank namens ASTRIA-Graph. Sie stützt sich auf verschiedene Quellen, etwa Kataloge der amerikanischen und russischen Regierungen.

Wenn man die Bezeichnung eines bestimmten Objekts eingibt, stellt es die Umlaufbahn mit einer violetten Linie dar. In einer Reihe von Fällen klappt das aber nicht ohne weiteres, etwa bei einer 2007 gestarteten russischen Raketenstufe mit der Datenbanknummer 32280. Wenn Jah diese Zahl eingibt, zeichnet ASTRIAGraph zwei violette Linien – die Quellen aus den USA und Russland geben völlig unterschiedliche Orbits für das gleiche Objekt an. Jah betont, ohne das Zutun einer dritten Seite ließe sich unmöglich die richtige Bahn herausfinden.

ASTRIAGraph enthält derzeit viele, aber nicht alle der wichtigsten Informationen. Der Katalog des US-Militärs – die größte öffentlich zugängliche Datenbank dieser Art – unterschlägt mit ziemlicher Sicherheit Angaben, etwa über geheime Satelliten. Auch die russische Regierung hält viele ihrer Daten zurück. In den letzten Jahren haben außerdem kommerzielle Unternehmen Verzeichnisse angelegt, doch sie bieten meistens keinen uneingeschränkten Zugriff.

Jah beschreibt sich selbst als Weltraum-Umweltaktivist: »Ich will das All zu einem sicheren und freien Ort machen,



Satellitenfischen mit Netz und Harpune

Mit verschiedenen Manövern, etwa dem Auswerfen eines Netzes und dem Abfeuern einer Harpune, testen Ingenieure des Projekts RemoveDEBRIS Ansätze, Weltraumschrott zu fangen und einem feurigen Ende in der Erdatmosphäre zuzuführen. »Das soll zunächst einmal die Einsatzfähigkeit der neuen Technologie demonstrieren«, kommentiert Guglielmo Aglietti, Direktor des Surrey Space Centre an der University of Surrey und wissenschaftlicher Leiter des Projekts.

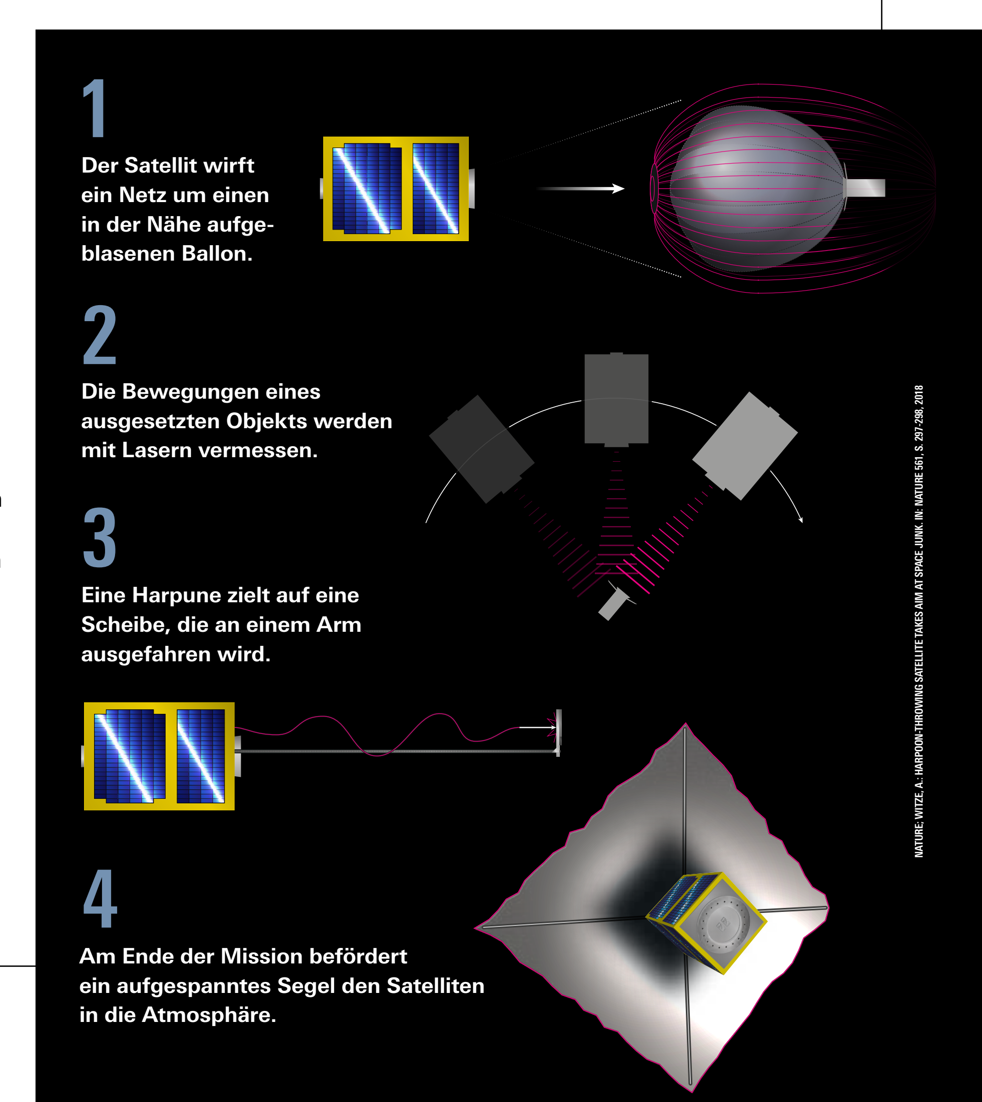
Auch weitere Forschergruppen versuchen, zumindest einen Teil der 20 000 bekannten Schrottteile mit mindestens fünf bis zehn Zentimetern Größe aus dem Orbit zu holen. 2017 plante die japanische Raumfahrtbehörde, Weltraumschrott mit einer Art elektrodynamisch gesteuertem Lasso einzufangen; der Versuch scheiterte, als sich die Leine nicht wie erwartet löste. Eine Ausgründung der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne sucht nach Finanziers für einen Satelliten, der ein konisches Netz auswirft. Die ESA arbeitet an Ideen für ein komplexeres Raumfahrzeug, das Weltraummüll entsorgen und vielleicht sogar einen Satelliten im Orbit auftanken könnte, um sein Leben zu verlängern.

Die 15 Millionen Euro teure RemoveDEBRIS-Mission indes soll kostengünstige Optionen testen, die Schrott aus dem Orbit ziehen könnten. »Es wird immer umstritten bleiben, ob es sich lohnt, aufzuräumen oder ob man die Dinge einfach dort lassen sollte, wo sie sind«, meint Aglietti. Aber es sei vielleicht die Mühe wert, zumindest besonders große und gefährliche Stücke zu entfernen, wie zum Beispiel den inzwischen ausgefallenen, busgroßen Envisat-Erdbeobachtungssatelliten der ESA.

Der Satellit erprobt über einen Zeitraum von einigen Monaten sorgfältig choreografiert vier verschiedene Technologien. Er startete im April 2018 zur Internationalen Raumstation und wurde später von dort aus ins All entlassen. Das erste Experiment mit dem Netz fand am 16. September 2018 statt. Dazu wurde ein etwa brotlaibgroßer »CubeSat« freigesetzt, der einen Ballon mit einem Meter Durchmesser aufblies. RemoveDEBRIS schleuderte dann sein Netz hinterher, das sich mit Hilfe von Gewichten darum schloss.

Das zweite Experiment scannt einen weiteren ausgeworfenen CubeSat mit Laserstrahlen, um Techniken zum präzisen Ausmessen von Weltraumschrott und zur Navigation in dessen Nähe zu prüfen. Beim dritten Versuch fährt der RemoveDEBRIS-Satellit einen Arm 1,5 Meter in den Weltraum aus, klappt eine Zielscheibe hoch und schießt mit einer Harpune darauf. Schließlich wird der Satellit ein Segel entfalten, durch dessen Luftwiderstand er schließlich in dichtere Atmosphärenschichten gelangt, wo er verglüht.

Ein Industriekonsortium hat bei dem Projekt den Bau übernommen; Tochtergesellschaften des Luft- und Raumfahrtkonzerns Airbus lieferten beispielsweise das Netz und die Harpune. Obwohl das Team jedes Experiment am Boden getestet hat, können in der Umgebung des Weltraums immer Dinge schieflaufen. »Darauf sind wir vorbereitet«, versicherte Aglietti vor Beginn der Tests. Bisher ist bei der Mission alles gut gegangen, und vielleicht werden Netze und Harpunen irgendwann tatsächlich nützliche Waffen gegen den Weltraumschrott.



der auch noch für zukünftige Generationen nutzbar ist.« Bis dahin erleben wir in der Weltraumgemeinschaft die Tragik der Allmende, bei der alle Nutzer eine gemeinsame Ressource verschmutzen.

Zumindest bei der US-Raumfahrtpolitik gibt es Fortschritte. 2017 sprach Jah vor dem US-Kongress auf Einladung des Senators Ted Cruz. Im Juni 2018 unterzeichnete Präsident Donald Trump eine neue Richtlinie, die unter anderem die Verantwortung für die Katalogisierung vom Militär auf eine zivile Behörde übertragen soll. Das wird zu sonst seltenen Gelegenheiten führen, auf höchster Ebene der US-Regierung über Weltraummüll zu diskutieren.

Wenn Kontrolleure einer laufenden Mission Meldungen über Gegenstände auf einem Kollisionskurs erhalten, wissen sie oft nicht genau, wie gefährlich die heranrasenden Trümmer für den betroffenen Satelliten sind. »Mit immer mehr Objekten und den zugehörigen Unsicherheiten nehmen die Warnungen inzwischen kein Ende mehr«, sagt Frueh. Um das tatsächliche Risiko einzuschätzen, brauchen Satellitenbetreiber genauere Informationen, aber in den Katalogen steht nur selten etwas über die Beschaffenheit der Körper. Dann nutzen das Militär und andere Organisationen Teleskope, mit denen sie in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit Hinweise sammeln.

In Zusammenarbeit mit der Air Force entwickeln Frueh und ihre Kollegen Methoden, um schnell Details in Erfahrung zu bringen. Dazu untersucht sie, wie ein Objekt das Sonnenlicht reflektiert, und kann daraus zum Beispiel ableiten, ob es unkontrolliert taumelt. Ihr Team experimentiert auch mit einem selbstlernenden Algorithmus, der den Prozess der Charakterisierung beschleunigen könnte.

Sobald die Forscher etwas über die Bedrohung wissen, haben sie prinzipiell eine Reihe von Möglichkeiten, sie unschädlich zu machen. Einige Vorschläge klingen fast schon wie Sciencefiction und setzen auf Magnete oder Laser, um Trümmer im Orbit abzulenken. Forscher der britischen University of Surrey experimentieren mit einem Fangnetz. Es soll den Satelliten in die Atmosphäre schleppen, wo er verglüht (siehe »Satellitenfischen mit Netz und Harpune«, links).

Aber solche Strategien zur aktiven Säuberung bieten angesichts der wachsenden Zahl von Gegenständen im Orbit auf Dauer keine praktikable Lösung. Deshalb versuchen es andere Experten mit einem passiven Ansatz auf Basis der Anziehungskraft der Sonne und des Monds. Sie wirken sich unter gewissen Umständen durch so genannte Resonanzen ebenfalls merklich auf Bahnen von Satelliten aus. Dazu entwickelt Aaron Rosengren an der University of Arizona in Tucson neue Wege. Rosengren kam auf die Idee, als er das Schicksal von Satelliten im mittleren Erdorbit (MEO) studierte. Diese bewegen sich in Höhen zwischen etwa 2000 Kilometern, wo die niedrige Erdumlaufbahn endet, und 35 000 Kilometern, wo die geostationären Umlaufbahnen beginnen.

Satelliten im niedrigen Erdorbit lassen sich entsorgen, indem man sie zurück in die Atmosphäre führt, wo sie verglühen. Die meisten Satelliten in der weniger stark frequentierten geostationären Region werden sicher auf »Friedhofsorbits« platziert. Im MEO sind Satellitenbahnen auf Grund wechselseitiger Gravitationseinflüsse oft langfristig instabil – und von diesem Phänomen können die Betreiber von Satelliten profitieren. Ein Beispiel bietet das Gammastrahlenobservatorium INTEGRAL, das die ESA 2002 gestartet hat. INTEGRAL bewegt sich in einer exzentrischen Umlaufbahn, die sich von der niedrigen Erdumlaufbahn über den MEO bis in die geostationäre Umlaufbahn erstreckt. Normalerweise wäre der Satellit dort ein Jahrhundert lang stabil geblieben, aber im Jahr 2015 beschloss die ESA, die Parameter anzupassen. Mit kleinen Triebwerkszündungen haben die Missionskontrolleure das Teleskop in Gravitationsresonanzen gebracht, die es nun im Jahr 2029 wieder in die Atmosphäre eintreten lassen – statt erst Jahrzehnte später.

Himmlische Resonanzen führen ins atmosphärische Feuer

Rosengren zeigte gemeinsam mit Kollegen in Frankreich und Italien 2016, dass es eine Vielzahl von Resonanzen gibt, die das Verhalten von Objekten im MEO bestimmen. Der Astrodynamiker sieht hier eine mögliche Lösung des Schrottproblems. Es gibt Wege in diesem Netz von Resonanzen, die direkt in die Atmosphäre führen. Andere Forscher hatten das Konzept schon vor ihm untersucht, aber Rosengren versucht, es ins Rampenlicht zu bringen. »Wir nennen das Prinzip passive Entsorgung durch Resonanzen und Instabilitäten«, meint Rosengren. »Und vermutlich sollten wir uns noch einen besseren Namen ausdenken.«

Diese himmlischen Entsorgungspfade könnten relativ leicht zugänglich sein. Im Juli 2018 berichteten Rosengren und seine Kollegen auf einer Konferenz in Kalifornien von ihrer Analyse der Schicksale von US-Satelliten aus den 1960er Jahren. Die Wissenschaftler fanden heraus, dass eine Änderung der Startzeit um nur 15 Minuten zu großen Unterschieden bei der Verweildauer eines Satelliten im Orbit führen kann. Solche Informationen könnten dazu dienen, die besten Startfenster zu berechnen.

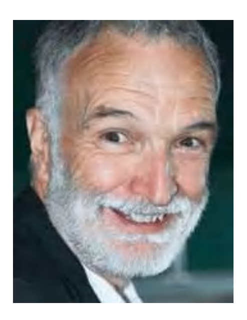
Im Fall von CryoSat-2 Anfang Juli 2018 mussten die Ingenieure der ESA das Wochenende durcharbeiten, um das Ausweichmanöver vorzubereiten. Nachdem der Weltraumschrott sicher vorbeigeflogen war, brauchte der Satellit einige Tage, um wieder zu den planmäßigen Beobachtungen in seine normale Umlaufbahn zurückzukehren, sagt ESA-Ingenieur Vitali Braun.

Doch die Warnmeldungen hörten nicht auf. In den darauffolgenden Wochen steuerten die Wissenschaftler mindestens sechsmal weitere Satelliten aus dem Weg bedrohlicher Trümmer. Am 23. August 2018 musste der ESA-Satellit Sentinel-3B zum ersten Mal Platz machen – da war er gerade erst seit vier Monaten im Orbit. Jetzt zu handeln, dürfte in Zukunft eine Menge solchen Ärgers ersparen. ◂

nature

www.nature.com
Nature 561, S. 24–26, 6. September 2018, sowie
Nature 561, S. 297–298, 20. September 2018 (»Satellitenfischen mit Netz und Harpune«)

SCHLICHTING! GRENZERFAHRUNGEN ZWISCHEN EIS UND SCHNEE



Bei Temperaturen um den Gefrierpunkt bewirkt ein Hin und Her zwischen Schmelzen und Gefrieren im Schnee einen erstaunlichen Reichtum an eisigen Strukturen.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit Januar 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene – mit diesem Heft also seit genau zehn Jahren!

spektrum.de/artikel/1609514

Nebeneindrücke sind wieder einmal das Bestimmende
Robert Musil (1880–1942)

In unseren Breiten sind harte Winter selten. Wenn es einmal geschneit hat, dauert es oft nicht lange bis zum nächsten Tauwetter. Es lohnt sich allerdings, die Phänomene in dem Grenzbereich zwischen Fest und Flüssig aufmerksam zu beobachten.

In einem solchen Fall hatte es nicht viel geschneit – aber immerhin waren insbesondere die Felder und Wiesen mit einer dünnen Schneeschicht bedeckt. Die nächsten Tage über schien die Sonne, die Lufttemperatur blieb dennoch ein bis zwei Grad unter dem Gefrierpunkt. Ein Schmelzen der Schneedecke insgesamt war also nicht zu erwarten. Trotzdem bekam diese auf einem mit Wintergetreide bestellten Feld nach und nach immer mehr und größer werdende Löcher (siehe Foto rechts).

Ausgangspunkt für solche Lücken sind in den meisten Fällen exponierte Stellen, bei denen Steine oder andere Störungen die Schneeschicht durchbrechen oder diese so dünn ist, dass der Boden hindurchschimmert. Normalerweise reflektiert der Schnee das Sonnenlicht – seine blendend weiße Farbe ist dafür ein deutliches Zeichen – und absorbiert nur wenig Energie. Gelangt ein Teil des Lichts jedoch zum dunklen Ackerboden, nimmt er es fast vollständig auf. Dabei wird die Sonnenenergie in thermische Energie umgewandelt.

Die lokale Erwärmung bleibt nicht ohne Wirkung auf die kühlere Nachbarschaft. Transportvorgänge beginnen die Temperaturdifferenz auszugleichen: Einerseits fließt durch Wärmeleitung Energie an angrenzende Bereiche, andererseits strahlt der beleuchtete Fleck Wärme ab. Die Luft über dem Erdreich erwärmt sich dadurch, dehnt sich aus und steigt auf. Während sie zu der dünnen Schneeschicht über dem Geschehen gelangt und ihr Energie überträgt, ersetzt eine Konvektionsbewegung sie durch absinkende kalte Luft.

Zusätzlich nimmt die Schneedecke die Strahlungsenergie des Erdreichs auf, denn anders als beim sichtbaren Sonnenlicht absorbieren die Eiskristalle die unsichtbare Infrarotstrahlung gut. So bringt die Sonne über Umwege dann doch noch den Schnee zum Schmelzen. Allerdings hält sich der Effekt wegen der geringen Temperaturdiffe-

Durch Löcher im Schnee ist das dunkle Erdreich sichtbar. Der Randbereich ist vereist und transparent.



H. JOACHIM SCHLICHTING


H. JOACHIM SCHLICHTING

Eine etwa zehn Zentimeter lange Eisstruktur reicht weit über ein Loch hinweg. Sie hängt lediglich an einem schmalen Hals, dem man eine solche Tragkraft erst einmal gar nicht zutraut.

renzen und der kalten Umgebungsluft in Grenzen. Darum läuft der Vorgang alles andere als stürmisch ab, zumal bei Eiskristallen die zum Schmelzen nötige Energiemenge ziemlich groß ist.

Wenn es einmal so weit ist, tropft das entstehende Wasser kaum ab, sondern wird vorwiegend vom Kapillarsystem des angrenzenden Schnees aufgenommen. Schließlich ist dieser nicht nur porös, sondern obendrein sehr gut benetzbar: Um sich mit ihm zu vereinigen, braucht das Wasser weniger Energie als für eine Grenzschicht zur Luft.

Das Schmelzwasser gerät also großflächig in Kontakt mit dem Schnee und kühlt durch weiteren Wärmeaustausch wieder ab. Sobald der Gefrierpunkt unterschritten wird, erstarrt es. Die für den Schnee charakteristischen Luftzwischenräume sind damit verschwunden – eine kompakte Eisschicht entsteht. Daher wird das Loch nicht bloß allmählich größer, sondern immer mehr durch einen festen kristallinen Randbereich begrenzt. Dieser ist auf Grund der unregelmäßigen Struktur der ursprünglichen Schneeschicht und wegen anderer Zufälligkeiten äußerst zerklüftet. Im Vergleich zur porösen und bröckeligen Konsistenz des Schnees ist das Eis allerdings hart und relativ stabil.

Das Schmelzen und erneute Gefrieren kann sich je nach Wetterlage wiederholen. Im vorliegenden Fall war dazu mehrere Tage lang Gelegenheit. In den Nächten wurde der Vorgang zwar unterbrochen, und infolge der Anlagerung von Reifkristallen wuchs die Schneeschicht sogar noch. Doch kaum schien wieder die Sonne, breiteten sich die Löcher im Schnee aus und hinterließen immer waghalsigere Eiskonstruktionen (siehe Foto oben). Intuitiv wirkt es, als hätten sie längst unter der eigenen Last abbrechen müssen.

Aber unsere Alltagserfahrungen trügen, wenn wir ein plausibles Verhältnis von getragener Masse und Robustheit des Stegs einschätzen wollen. Die Kraft, mit welcher die vergleichsweise große Eisstruktur gehalten wird, ist proportional zur Querschnittsfläche der schmalen Eisbrücke, an der sie hängt. Wir sind mittlere Dimensionen gewohnt und haben beispielsweise ein gutes Gefühl dafür entwickelt, ob ein Brett stark genug ist, um uns über eine Vertiefung zu tragen. Im Bereich kleiner Abmessungen versagt unsere Intuition häufig. Das liegt hier an der so genannten Flächen-Volumen-Relation: Wenn man beispielsweise den Durchmesser eines Körpers um den Faktor 10 verkleinert, verringert sich die zum Volumen proportionale Masse um den Faktor 10^3, also 1000. Die zum Querschnitt der Brücke proportionale Kraft sinkt aber nur mit dem Faktor 10^2, das heißt 100. Je kleiner ein Objekt ist, desto filigraner können darum die stützenden Elemente sein.

Schaut man sich die fragil erscheinenden Eisstrukturen genauer an, beeindrucken ihr oft bunt schillernder Glanz und vor allem ihr Formenreichtum. Nicht selten glaubt man, darin Gesichter oder vertraute Gestalten zu erblicken – ein Pareidolie genanntes Phänomen. Man erlebt beim Übergang zwischen Schmelzen und Gefrieren einmal mehr, was der erste deutsche Experimentalphysiker Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) viel allgemeiner so ausgedrückt hat: »Auf der Grenze liegen meistens die merkwürdigsten Geschöpfe.«

MATHEMATIK

UNENTSCHEIDBARE AUSSAGEN ÜBER DIE NATUR

Die mathematische Logik lehrt uns, dass es grundsätzlich unmöglich sein kann, eine Behauptung zu beweisen oder zu widerlegen. Überraschenderweise gilt das nicht nur für abstrakte mathematische Aussagen, sondern im Prinzip auch für solche über real existierende Gegenstände.





ANDREAS BATTENBERG, TUM

Toby S. Cubitt (links) ist Royal Society Research Fellow und Dozent für Quanteninformatik am University College in London. Nach einer Promotion in Physik sowie Postdoc-Stellen in Mathematik und Computerwissenschaft widmet er sich jetzt Fragen der Quantenmechanik, die all diese Bereiche überspannen. **David Pérez-García** (Mitte) ist Professor für Mathematik an der Universidad Complutense und ständiges Mitglied des Instituto de Ciencies Matemáticas, beide in Madrid. Er arbeitet an mathematischen Problemen der Quantenphysik. **Michael Wolf** ist Professor für Mathematische Physik in der Fakultät für Mathematik der Technischen Universität München. Seine Forschungsarbeit konzentriert sich auf mathematische und konzeptionelle Grundlagen der Quantentheorie.

spektrum.de/artikel/1609516

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Wir drei saßen zusammen in einem Café in Seefeld, einem kleinen Städtchen tief in den österreichischen Alpen. Es war Sommer 2012, und wir steckten fest. Nicht in dem Café, im Gegenteil: Der prachtvolle Sonnenschein, der glitzernde Schnee auf den Alpengipfeln und die wunderschöne Umgebung verlockten uns nur allzu sehr, dem mathematischen Problem, mit dem wir nicht vorankamen, davonzulaufen und nach draußen zu gehen. Wir versuchten, zwei der großen intellektuellen Errungenschaften des 20. Jahrhunderts zusammenzubringen: auf der einen Seite die mathematischen Erkenntnisse von Kurt Gödel und Alan Turing, auf der anderen Seite die Quantenphysik. Das war zumindest die große Idee, die uns zwei Jahre zuvor gekommen war, während wir uns ein Semester lang am Mittag-Leffler-Institut nahe Stockholm mit Quanteninformation befassten.

Da das Gebiet für uns vollkommen neu war, nahmen wir uns für den Anfang ein kleines und nicht besonders bedeutendes Problem vor. Seit Monaten hatten wir einen Beweis für ein ähnliches Problem. Um ihn aber auf unseres übertragen zu können, mussten wir dieses auf recht künstliche und unbefriedigende Weise konstruieren – so, als würden wir die Frage passend zur Antwort zurechtmachen.

In der Pause nach dem ersten Vortragsblock auf dem Workshop in Seefeld, der uns 2012 zusammengebracht hatte, gingen wir das Problem wieder an und fanden immer noch keinen Ausweg. Halb im Scherz fragte einer von uns (Michael Wolf): »Warum beweisen wir nicht die Unentscheidbarkeit von etwas, das die Leute wirklich interessiert, wie die Spektrallücke?«

Zu dieser Zeit beschäftigte uns nämlich die Frage, ob bestimmte Probleme der Physik unentscheidbar sind. Diese Begriffsbildung stammt eigentlich aus der mathematischen Logik. Eine Aussage ist unentscheidbar, wenn sie weder bewiesen noch widerlegt werden kann – und diese Unmöglichkeit ist manchmal sogar beweisbar (**Spektrum** September 2017, S. 72). In der Physik würde das bedeuten, dass es eine vollkommen vernünftige Frage zu einem physikalischen System gäbe, und es wäre unmöglich, diese Frage zu beantworten – nicht weil unsere Messmethoden mangelhaft oder unser Verstand beschränkt sind, sondern aus prinzipiellen Gründen.

Im Gegensatz zu der Frage, an der wir feststeckten, ist das Spektrallückenproblem, das Michael vorschlug, von zentraler Bedeutung in der Physik (mehr dazu später). Wir hatten zwar den Verdacht, es könnte unentscheidbar sein, waren aber sehr unsicher, ob wir in der Lage sein würden, diese Frage zu klären. Wenn wir es allerdings schafften, wäre das eine Erkenntnis von echter Relevanz für die Physik und obendrein eine erhebliche mathematische Leistung.

Es ist möglich, einen unendlich großen Badezimmerfußboden aperiodisch zu kacheln: Das Muster ist keine unendlichfache Wiederholung eines Grundmusters, selbst wenn dieses beliebig groß wäre. Während der praktische Nutzwert dieser Aussage wenig ersichtlich ist, lässt sich mit ihrer Hilfe die Unentscheidbarkeit eines bedeutenden physikalischen Problems beweisen.

Michaels halb scherzhafter Vorschlag führte uns in ein großes Abenteuer. Drei Jahre später hatten wir es geschafft: Unser Beweis von der Unentscheidbarkeit der Spektrallücke wurde im Fachmagazin »Nature« publiziert.

Um zu verstehen, was es damit auf sich hat, müssen wir einige der Gedankengänge vom Beginn des 20. Jahrhunderts nachzeichnen, welche die moderne Physik, Mathematik und Computerwissenschaft begründeten. Zu all diesen sehr verschiedenen Ideen hat David Hilbert (1862–1943) beigetragen, der bedeutendste Mathematiker seiner Zeit.

Schon früh lieferte Hilbert entscheidende Beiträge zur Funktionalanalysis, insbesondere zu deren Teilgebiet namens Spektraltheorie, die sich als unser entscheidendes Hilfsmittel herausstellen sollte. Sein Interesse daran hatte zunächst rein mathematische Gründe. Aber wie so oft kamen seine Ergebnisse den Physikern seiner Zeit zur Klärung einer verwirrenden Frage gerade recht.

Energieniveaus von einzelnen Atomen und größeren Ensembles

Viele Stoffe beginnen zu glühen, wenn man sie erhitzt – ihre Atome senden Licht aus. Das intensiv gelbe Licht der Natriumdampflampen, die oft Fußgängerüberwege beleuchten, ist ein gutes Beispiel: Natriumatome emittieren überwiegend Licht einer Wellenlänge von 590 Nanometer, im gelben Teil des sichtbaren Spektrums. Ein Atom gibt Licht ab oder absorbiert es, wenn ein Elektron in seiner Hülle von einem Energieniveau zu einem anderen wechselt. Die Frequenz dieses Lichts hängt von der Energiedifferenz (»Lücke«) zwischen den Niveaus ab; also kann man aus den Frequenzen des emittierten wie des absorbierten Lichts die Lücken zwischen den verschiedenen Energieniveaus erschließen. Um die Erklärung dieser Phänomene rangen die Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Es war die Geburtsstunde der Quantenphysik, und Hilberts Spektraltheorie spielte dabei eine zentrale Rolle.

Eine der Lücken zwischen den Energieniveaus ist von besonderer Bedeutung, und zwar die zwischen dem niedrigsten Energieniveau eines Atoms, dem so genannten Grundzustand, und dem nächsthöheren, dem ersten angeregten Zustand. Wegen ihrer Bedeutung wird sie häufig einfach nur als Spektrallücke bezeichnet.

Energieniveaus gibt es nicht nur für einzelne Atome, sondern auch bei Materialien, die aus vielen eng miteinander wechselwirkenden Atomen bestehen. In einigen von ihnen gibt es wie bei Einzelatomen einen deutlichen Niveauunterschied zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand. Andere Materialien dagegen sind »lückenlos«: Es gibt angeregte Zustände mit beliebig kleiner Energiedifferenz zum Grundzustand. Das heißt, eine verschwindend kleine Energiezufuhr, zum Beispiel durch die Wärmebewegung der Atome des Materials, kann dieses bereits in einen angeregten Zustand versetzen. Im Grundzustand befindet sich das Material also nur bei Abwesenheit jeglicher Wärmebewegung, das heißt am absoluten Nullpunkt der Temperatur (–273,15 Grad Celsius). Ob es eine Spektrallücke hat oder nicht, ist entscheidend für sein Verhalten bei niedrigen Temperaturen. Das gilt insbesondere für Quanten-Phasenübergänge.

Von einem Phasenübergang spricht man, wenn ein Material plötzlich und dramatisch seine Eigenschaften ändert. Einige Phasenübergänge sind uns sehr vertraut: Eis schmilzt unter Wärmezufuhr, und Wasser verdampft. Aber es gibt exotischere, so genannte Quanten-Phasenübergänge, die auch bei beliebig niedrigen Temperaturen stattfinden können. So kann die Änderung eines äußeren magnetischen Felds oder des Drucks bewirken, dass ein Isolator ein Supraleiter wird oder ein Festkörper eine Supraflüssigkeit.

Wie kann ein Material einen Phasenübergang nahe dem absoluten Nullpunkt durchlaufen, bei dem es keine Wärmebewegung gibt, die Energie bereitstellen könnte? Hier kommt es auf die Spektrallücke an. Wenn es keine gibt, sondern ein Kontinuum von Energieniveaus, das bis zum Grundzustand reicht, dann genügt die kleinste Energiemenge, um den Phasenübergang einzuleiten. Eigentlich braucht es sogar überhaupt keine Energie. Denn infolge der sonderbaren Quanteneffekte, die bei diesen Temperaturen das Geschehen beherrschen, kann sich das Material vorübergehend aus dem Nichts ein bisschen Energie »ausleihen«, mit deren Hilfe einen Phasenübergang vollziehen und dann die Energie wieder »zurückgeben«. Unser Verständnis von Quanten-Phasenübergängen und generell den Zuständen quantenmechanischer Systeme am Temperaturnullpunkt (»Quantenphasen«) hängt also ganz entscheidend an der Frage, ob ein Material eine Spektrallücke hat oder nicht.

Darüber hinaus findet sich das Spektrallückenproblem an zahlreichen Stellen in der theoretischen Physik wieder. Viele berühmte und seit Langem ungelöste Probleme in der Physik der kondensierten Materie laufen auf das Spektrallückenproblem für ein bestimmtes Material hinaus.

Eine eng verwandte Frage existiert auch in der Teilchenphysik. Es gibt gute Gründe für die Annahme, dass die grundlegenden Gleichungen, die Quarks und deren Wechselwirkungen beschreiben, die Existenz einer »Massenlücke« erzwingen: Die von diesen Gleichungen beschriebenen Teilchen haben entweder die Masse null oder eine Minimalmasse; es gibt also keine Partikel mit beliebig kleiner Masse. Experimentelle Daten zum Beispiel vom Large Hadron Collider bei Genf unterstützen diese Annahme ebenso wie gewaltige numerische Berechnungen mit Hilfe von Supercomputern. Aber sie streng zu beweisen, ist allem Anschein nach extrem schwierig – so sehr, dass das Clay Mathematics Institute dieses Yang-Mills-Massenlücken-Problem in die Reihe der sieben Millennium-Probleme aufgenommen hat, auf deren Lösung ein Preis von je einer Million Dollar ausgesetzt ist.

Alle diese Fragen lassen sich auf ein verallgemeinertes Spektrallückenproblem zurückführen. Und für jeden, der an einer allgemeinen Antwort auf eine von ihnen arbeitet, haben wir eine schlechte Nachricht. Unser Beweis zeigt, dass diese Fragen noch weit schwieriger sind als vermutet. Ihre Lösung läuft nämlich auf ein Problem aus der mathematischen Logik hinaus, das Entscheidungsproblem.

Gödels Unvollständigkeitssatz und das Halteproblem für die Turing-Maschine

In den 1920er Jahren verfolgte Hilbert das große Ziel, die Mathematik auf ein stabiles, gesichertes Fundament zu stellen – ein Unternehmen, das als Hilberts Programm bekannt wurde. Er war der Überzeugung, dass es zumindest im Prinzip möglich sein müsste, jede beliebige mathematische Aussage entweder zu beweisen oder zu widerlegen. Es sollte nichts geben, das man aus prinzipiellen Gründen nicht beweisen kann.

1928 präzisierte er diese Frage in Form des »Entscheidungsproblems« – das auch im Englischen so heißt. Gibt es eine Methode oder einen Algorithmus, der zu einer vorgelegten mathematischen Aussage entscheidet, ob sie wahr oder falsch ist?

Für die Aussage »Die Multiplikation einer beliebigen ganzen Zahl mit 2 ergibt eine gerade Zahl« würde dieses Verfahren leicht zu dem Ergebnis »wahr« kommen: Etwas elementare Logik und Arithmetik genügen. Für andere Aussagen ist das weniger klar. Zum Beispiel: »Beginne mit einer beliebigen natürlichen Zahl. Wenn sie gerade ist, teile sie durch 2; wenn sie ungerade ist, multipliziere sie mit 3 und addiere 1. Wende dieselbe Vorschrift auf das Ergebnis an, auf das nächste Ergebnis wieder dieselbe Vorschrift und so weiter. Irgendwann erreicht die Folge der Ergebnisse die Zahl 1.« Allem Anschein nach ist diese Aussage über die berüchtigte Collatz-Folge wahr, aber bewiesen ist sie bis heute nicht (**Spektrum** Februar 2014, S. 72).

Hilberts Hoffnungen sollten bald begraben werden. 1931 veröffentlichte Kurt Gödel (1906–1978) seine Aufsehen erregenden Unvollständigkeitssätze. Darin bewies er, dass es sinnvolle mathematische Aussagen über ganze Zahlen gibt, die weder bewiesen noch widerlegt werden können – was die Grundlagen der Mathematik bis ins Mark erschütterte.

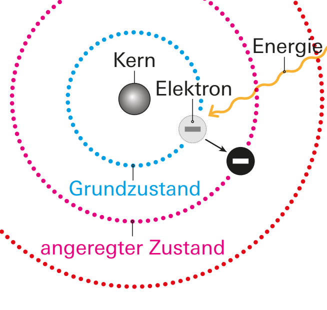
Wer Schwierigkeiten hat, das zu verstehen, befindet sich in guter Gesellschaft. Hier eine Andeutung von Gödels Gedankengang: Wenn jemand sagt »Dieser Satz ist eine Lüge«, sagt diese Person die Wahrheit, oder lügt sie? Wenn sie die Wahrheit sagt, dann ist der Satz nach seinem Wortlaut eine Lüge. Aber wenn sie lügt, dann ist er wahr. Dieses Dilemma ist bekannt als das Lügner-Paradox. Obwohl der Satz vollkommen vernünftig zu sein scheint, lässt sich ihm

AUF EINEN BLICK
DAS PROBLEM DER SPEKTRALLÜCKE

1 Kurt Gödel entdeckte in den 1930er Jahren, dass es bei manchen mathematischen Aussagen prinzipiell unmöglich ist, zu beweisen, ob sie wahr oder falsch sind – sie sind »unentscheidbar«.

2 Ein bedeutendes Problem der Quantenphysik ist ebenfalls unentscheidbar, das Spektrallückenproblem: Gibt es eine Differenz zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand eines Materials?

3 Damit ist denkbar, dass weitere Fragen nicht beantwortbar sind. Dazu zählt das Massenlückenproblem aus der Teilchenphysik: Kann es Teilchen mit beliebig kleiner Masse ungleich null geben?

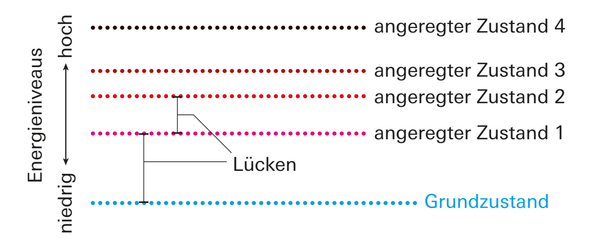




Die Spektrallücke

Während in einzelnen Atomen die Energieniveaus stets durch eine echte Lücke getrennt sind, gibt es in ausgedehnten Materialien, die aus unzähligen Atomen bestehen, manchmal keinen Abstand zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand. Dann genügt die kleinste Energiemenge, um das Material aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand zu heben.

Mit Spektrallücke
Es gibt diskrete Energieniveaus, so dass jeweils eine bestimmte Energiemenge notwendig ist, um die Lücken zwischen den Niveaus zu überwinden.



Ohne Spektrallücke
Die angeregten Zustände bilden ein Kontinuum über dem Grundzustand. So kann das Material durch beliebig kleine Energien angeregt werden.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

kein Wahrheitswert zuweisen. Gödel gelang es, das Lügner-Paradox als Beziehung unter natürlichen Zahlen auszudrücken und so in das Reich der Arithmetik zu versetzen; diese ist ihrerseits eine auf Axiome gegründete Theorie.

Der nächste Protagonist in der Geschichte des Entscheidungsproblems ist der englische Computerwissenschaftler Alan Turing (1912–1954; siehe **Spektrum** Juni 2012, S. 80). Die Öffentlichkeit kennt ihn, weil er im Zweiten Weltkrieg maßgeblich an der Entschlüsselung der deutschen militärischen Geheimnachrichten beteiligt war, die Fachwelt aber vor allem wegen seiner Arbeit von 1937 »On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem«. Stark beeinflusst von Gödels Ergebnissen, hatte der junge Turing eine negative Antwort auf Hilberts Entscheidungsproblem gegeben, indem er bewies, dass es keinen allgemeinen Algorithmus geben kann, der zu jeder mathematischen Aussage entscheidet, ob sie wahr oder falsch ist. (Kurz vor Turing bewies dies unabhängig auch der amerikanische Mathematiker Alonzo Church. Turings Beweis war letztlich jedoch bedeutender. Manchmal erweist sich in der Mathematik der Beweis eines Ergebnisses als wichtiger als das Ergebnis selbst.)

Zu diesem Zweck musste Turing den Begriff der berechenbaren Zahl (»computable number«) und damit den des Rechnens überhaupt präzise fassen. Und dazu wiederum ersann er eine idealisierte Maschine – wohlgemerkt bevor es die heute zum Rechnen genutzten Maschinen, die Computer, überhaupt gab (»Turing-Maschinen«, S. 70). Interessanterweise kann eine Turing-Machine theoretisch alles berechnen, was überhaupt berechenbar ist, wenn auch möglicherweise mit einem astronomisch hohen Zeitbedarf.

Die Idee der Turing-Maschine war noch bedeutender als die Lösung des Entscheidungsproblems. Indem Turing eine präzise, mathematisch strenge Definition für die Begriffe »Berechnung« und »Algorithmus« gab, begründete er die moderne Computerwissenschaft. Mit Hilfe dieses theoretischen Werkzeugs konnte er beweisen, dass kein mathematisches oder algorithmisches Verfahren eine einfache Frage für jeden Fall beantworten kann: Wird eine Turing-Maschine mit gegebenem Input jemals anhalten? Diese Frage ist als das Halteproblem bekannt. Zu jener Zeit war das Ergebnis schockierend. Heute haben sich die Mathematiker daran gewöhnt, dass jede Vermutung, an der sie arbeiten, beweisbar, widerlegbar oder eben unentscheidbar sein kann.

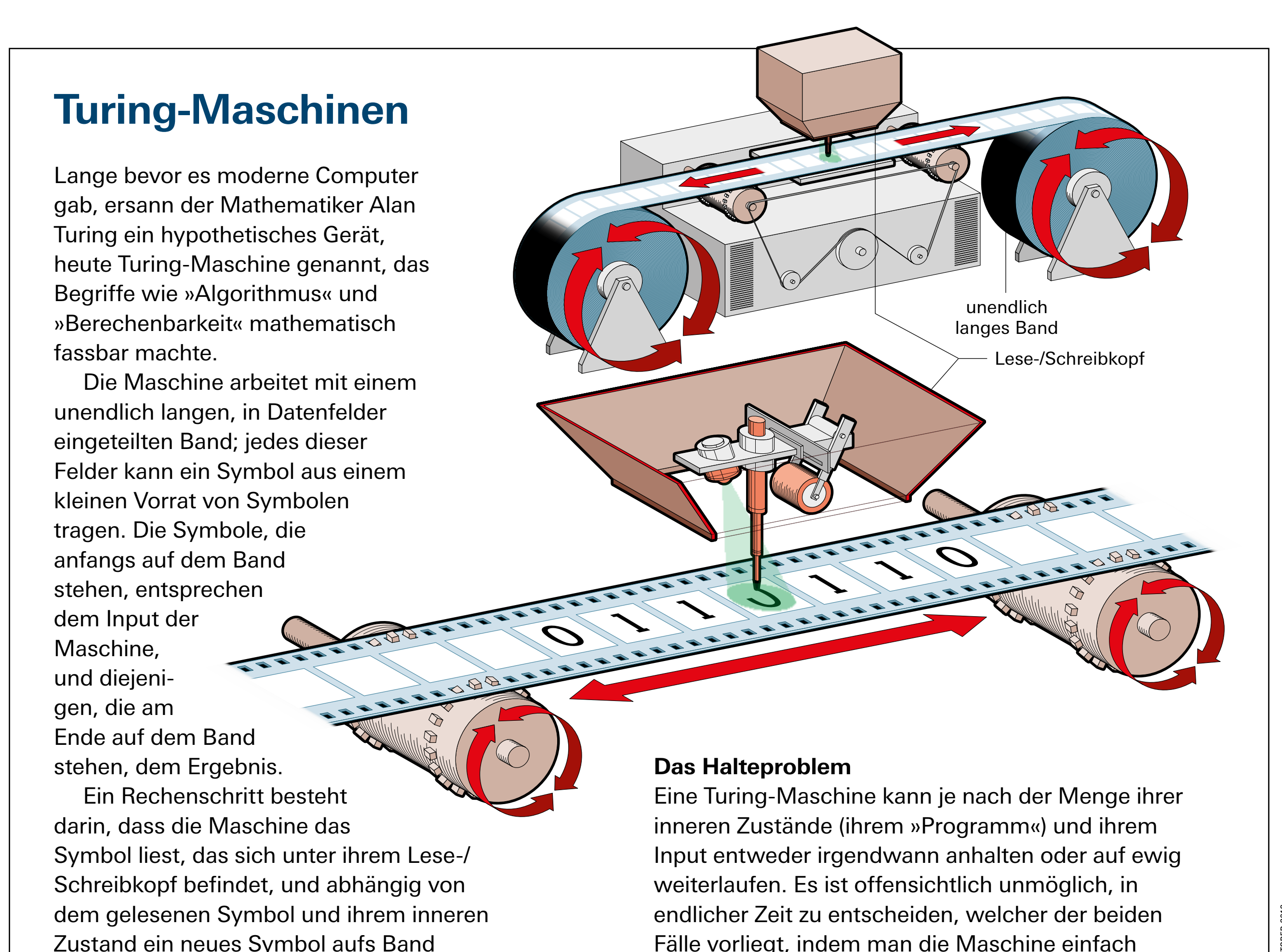
Der Quantencomputer kommt ins Spiel

In unserer Arbeit wollten wir alle diese verschiedenen Fäden zusammenführen. Genauer: Wir wollten die Quantenphysik der Spektrallücke, die Computerwissenschaft zur Unentscheidbarkeit und die Spektraltheorie zusammenbringen, um zu beweisen, dass das Spektrallückenproblem, wie das Halteproblem, zu den unentscheidbaren gehört, über die Gödel und Turing uns aufgeklärt hatten.

An jenem sonnigen Mittag in dem Café in Seefeld ging es darum, ein schwächeres mathematisches Ergebnis in Bezug auf die Spektrallücke zu beweisen. Wir klopften unsere Idee von verschiedenen Seiten ab, noch ohne sie aufzuschreiben, und es schien, als könnte sie funktionieren. Dann war die Pause zu Ende, der nächste Vortragsblock begann, und das Projekt ruhte eine Weile in unseren Köpfen.

Einige Monate später besuchte einer von uns (Toby Cubitt) Michael in München, und wir erledigten, was wir in Seefeld nicht getan hatten: Wir schrieben unsere Gedanken auf und überzeugten uns Schritt für Schritt, dass sie Hand und Fuß hatten. In den folgenden Wochen vervollständigten wir die Argumentation und hielten sie in einer privaten vierseitigen Notiz fest.

Was bis dahin mehr ein Spaß als ein ernsthaftes Projekt gewesen war – der Beweis der Unentscheidbarkeit der Spektrallücke –, rückte damit in den Bereich des Möglichen. Wir waren aber noch am Anfang eines langen Wegs. Was wir auf den vier Seiten in Händen hielten, war deutlich schwächer als das, was wir erreichen wollten – und wir wussten zunächst nicht, wie wir es ausbauen konnten.



Turing-Maschinen

Lange bevor es moderne Computer gab, ersann der Mathematiker Alan Turing ein hypothetisches Gerät, heute Turing-Maschine genannt, das Begriffe wie »Algorithmus« und »Berechenbarkeit« mathematisch fassbar machte.

Die Maschine arbeitet mit einem unendlich langen, in Datenfelder eingeteilten Band; jedes dieser Felder kann ein Symbol aus einem kleinen Vorrat von Symbolen tragen. Die Symbole, die anfangs auf dem Band stehen, entsprechen dem Input der Maschine, und diejenigen, die am Ende auf dem Band stehen, dem Ergebnis.

Ein Rechenschritt besteht darin, dass die Maschine das Symbol liest, das sich unter ihrem Lese-/Schreibkopf befindet, und abhängig von dem gelesenen Symbol und ihrem inneren Zustand ein neues Symbol aufs Band schreibt sowie das Band um ein Feld vor- oder zurückbewegt – oder eben anhält, womit ihre Arbeit beendet ist (**Spektrum** September 2017, S. 72).

Das Halteproblem
Eine Turing-Maschine kann je nach der Menge ihrer inneren Zustände (ihrem »Programm«) und ihrem Input entweder irgendwann anhalten oder auf ewig weiterlaufen. Es ist offensichtlich unmöglich, in endlicher Zeit zu entscheiden, welcher der beiden Fälle vorliegt, indem man die Maschine einfach laufen lässt. Es ist aber im Allgemeinen auch unmöglich, diese Frage zu entscheiden, indem man ein mathematisches Verfahren den Input und das Programm der Maschine analysieren lässt.

BEN GILLILAND / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

Hilfe kam abermals von einem Computer, der bislang nur in der Theorie existiert. Diesmal war es der Quantencomputer. In einer grundlegenden Arbeit von 1985 hatte der Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman (1918–1988) skizziert, wie man den Grundzustand eines Quantensystems für eine Berechnung nutzt. Das klingt zunächst paradox. Eine Berechnung ist ein dynamischer Prozess: Man gibt Input in den Computer ein, der durchläuft mehrere Arbeitsschritte und gibt schließlich ein Ergebnis aus. Der Grundzustand eines Quantensystems ist dagegen völlig ereignislos: Die Materie verharrt bei tiefsten Temperaturen, und es geschieht weiter nichts. Wie kann ein Grundzustand also eine Berechnung widerspiegeln?

Die Erklärung kommt von einer wesentlichen Eigenschaft der Quantenphysik: der Überlagerung. Ein Quantenobjekt kann sich in verschiedenen Zuständen zugleich befinden, wie Schrödingers berühmte Katze, die sich in einer Überlagerung der Zustände tot und lebendig befindet. Feynman schlug nun vor, einen Quantenzustand zu konstruieren, der die Überlagerung aller Schritte innerhalb einer Berechnung ist: Input, alle Zwischenschritte und Ergebnis. Später entwickelte Alexei Kitaev vom California Institute of Technology diese Idee beträchtlich weiter, indem er sich eine Quantenmaterie ausdachte, deren Grundzustand exakt diese Eigenschaft hatte.

Unsere Beweisidee lief nun darauf hinaus, das Halteproblem in das Spektrallückenproblem zu überführen. Wir wollten zeigen, dass jede Methode, die das Spektrallückenproblem löst, auch das Halteproblem lösen würde. Da aber Turing bereits gezeigt hatte, dass das Halteproblem unentscheidbar ist, würden wir damit beweisen, dass das Spektrallückenproblem ebenfalls unentscheidbar sein muss.

Das Halteproblem in einen Quantenzustand zu übersetzen, war keine neue Idee. Seth Lloyd, jetzt am Massachusetts Institute of Technology, hatte genau das vor fast zwei Jahrzehnten vorgeschlagen, um die Unentscheidbarkeit einer anderen Quantenfrage zu demonstrieren. Daniel Gottesman vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Ontario, Kanada) und Sandy Irani von der University of California in Irvine hatten mit Hilfe von Kitaevs Idee gezeigt, dass sogar eindimensionale Ketten miteinander wechselwirkender Quantenteilchen sehr komplexes

Verhalten zeigen können. Auf deren Version von Kitaevs Konstruktion hofften wir aufbauen zu können.

Vor einer Verbindung zum Spektrallückenproblem standen allerdings noch einige mathematische Hindernisse, die zunächst unüberwindlich schienen. Das erste betraf den Input für die Turing-Maschine, die ihrerseits durch den Quantencomputer verkörpert werden sollte. Beim Halteproblem geht es ja um die Unmöglichkeit, zu jedem beliebigen Input bestimmen zu können, ob die Turing-Maschine anhält. Also mussten wir unsere imaginäre Quantenmaterie so konzipieren, dass sie beliebigen Input zulässt.

Die Frage, ob man ein unendliches Badezimmer vorschriftsmäßig fliesen kann, ist unentscheidbar

Für das Problem, über dem wir in dem Café in Seefeld brüteten, hatten wir eine Lösungsidee: Man baue eine Art Verdrehung in die Wechselwirkung zwischen benachbarten Teilchen ein. Der Input sollte dann in den Drehwinkeln stecken. Im Januar 2013 trafen wir uns auf einer Konferenz in Peking und diskutierten diesen Ansatz. Wir erkannten jedoch bald, dass das, was wir beweisen wollten, einem Widerspruch zu Ergebnissen, die über Quanten-Turing-Maschinen bekannt waren, sehr nahekam. Bevor wir diese Richtung weiter verfolgten, mussten wir einen strengen, wasserdichten Beweis haben.

Zu dieser Zeit war Toby Cubitt von Madrid, wo er mehr als zwei Jahren in der Arbeitsgruppe von David Pérez-García zugebracht hatte, an die University of Cambridge gewechselt; aber seine neue Wohnung dort war noch nicht bezugsfertig. Für zwei Monate fand er Unterschlupf bei seinem Freund und Fachkollegen Ashley Montanaro, und in dieser Zeit machte er sich an einen strengen Beweis für den »verdrehten« Ansatz. Sein Freund fand ihn morgens am Küchentisch, mit einer Reihe leerer Kaffeetassen neben sich und auf dem Weg ins Bett, nachdem er die ganze Nacht hindurch Einzelheiten ausgearbeitet und alles sorgfältig aufgeschrieben hatte. Am Ende dieser zwei Monate schickte Toby den kompletten Beweis in die Runde. Die Turing-Maschine hatte ihren Input.

Mit diesem mittlerweile 29-seitigen Manuskript war das erste Hindernis ausgeräumt. Aber ein weit größeres folgte auf dem Fuß: Das sich ergebende Quantenmaterial hatte zwar den gewünschten Grundzustand, es war jedoch stets »lückenlos«, also ohne Spektrallücke. Für diese Konstruktion war das Spektrallückenproblem also alles andere als unentscheidbar.

Gleichwohl gelang es uns im Rahmen unseres ersten, schwächeren Projekts aus Seefeld, dieses Hindernis zu umgehen, und zwar durch einen Ausflug in ein weiteres Gebiet der Mathematik: Pflasterungen. Angenommen, Sie möchten einen Badezimmerboden fliesen, und zwar einen unendlich großen. Auf den (quadratischen) Kacheln befindet sich ein sehr einfaches Muster: Jede der vier Seiten hat eine Farbe; auf die Musterung im Inneren kommt es nicht an. Sie haben verschiedene (natürlich unendlich große) Schachteln mit je einer Sorte Kacheln, und Sie wollen eine »Anlegeregel« einhalten: Auf dem fertigen Boden soll beiderseits jeder Fuge stets dieselbe Farbe zu sehen sein. Ist das möglich?

Die Antwort hängt davon ab, welche Fliesensorten Ihnen zur Verfügung stehen. Mit manchen Sortimenten wird sich der unendliche Fußboden kacheln lassen, mit anderen wird sich irgendwann eine Stelle ergeben, an die keine Fliese in irgendeiner Orientierung mehr passt – vielleicht sehr bald, vielleicht aber auch erst nach ein paar Quadratkilometern (oder Quadratlichtjahren). Natürlich möchten Sie vor dem Kauf sicher sein, dass Ihnen das nie passieren wird. Leider ist diese Frage unentscheidbar, wie der Mathematiker Robert Berger 1966 bewiesen hat. Es gibt kein allgemeines Verfahren, das zu jedem vorgelegten Fliesensortiment Auskunft darüber gibt, ob es die Ebene pflastert.

Die Sache wäre noch überschaubar, wenn es nur um periodische Pflasterungen ginge, also solche, in denen sich – zum Beispiel – ein rechteckiges Stück stets parallelverschoben wiederholt. Um eine solche Pflasterung zu finden, genügt es, Kacheln aus dem Sortiment zu einem Rechteck zusammenzusetzen, in dem die Farbfolgen auf gegenüberliegenden Seiten übereinstimmen (»Einen unendlichen Badezimmerboden kacheln«, S. 72/73). Dann könnte man nämlich unendlich viele dieser Rechtecke einfach nebeneinanderlegen und hätte überall die Anlegeregel eingehalten. Der Grund für die Unentscheidbarkeit des Fliesenproblems ist, dass es auch nichtperiodische Lösungen geben kann: Muster, die den unendlichen Boden bedecken, sich aber nie wiederholen. Aus diesem Grund entscheidet sich die Frage, ob die Pflasterung scheitert, nicht innerhalb einer begrenzten Fläche, sondern möglicherweise überhaupt nicht.

Das entspricht genau der Situation bei der Turing-Maschine. Man könnte versuchen, das Halteproblem zu lösen, indem man die Maschine mit dem vorgegebenen Input eine große Zahl N von Schritten, sagen wir 100 000, laufen lässt. Aber das sagt noch nichts über die Maschinen, die nach N Schritten noch laufen, einerlei wie hoch man die Grenze N ansetzt. Entsprechend hat man bei einer nichtperiodischen Pflasterung, die bis zur N-ten Fliese gutgegangen ist, keine Gewähr, dass das auf ewig so weitergehen wird.

Als wir unser erstes kleines Ergebnis diskutierten, untersuchten wir eine Vereinfachung von Bergers ursprünglichem Beweis, die Rafael Robinson von der University of California in Berkeley 1971 verfasst hatte. Robinson erstellte ein Sortiment aus 56 Urkacheln, die ein verflochtenes Muster von immer größeren Quadraten bilden. Dieses Muster sieht periodisch aus, in Wirklichkeit wiederholt es sich aber nie exakt (siehe auch **Spektrum** November 2017, S. 26, und Mai 2011, S. 73). Wir hatten intensiv darüber diskutiert, ob man die Unentscheidbarkeit des Pflasterungsproblems auf irgendwelche Quanteneigenschaften übertragen könnte. Nur die Spektrallücke kam uns damals nicht in den Sinn, und wir verfolgten die Idee nicht weiter.

Im April 2013 besuchte Toby Charlie Bennett im Thomas-J.-Watson-Forschungszentrum der IBM. Bennett ist ein überaus vielseitiger Wissenschaftler; er zählt nicht nur zu den Gründervätern der Quanteninformationstheorie, sondern schrieb bereits 1970 eine bahnbrechende Arbeit über Turing-Maschinen (und fand nebenher noch Zeit für eine Studie über die Evolution von Kettenbriefen, siehe **Spektrum** Januar 2004, S. 78). Wir wollten ihn zu einigen technischen

Details unseres Beweises befragen, um sicher zu gehen, dass wir nichts übersahen. Obgleich Bennett seit 40 Jahren nicht mehr auf dem Gebiet gearbeitet hatte, erklärte er uns einige subtile Details seiner Arbeit von 1970 und lieferte uns damit die Bestätigung, dass unser Beweis in Ordnung war.

Nachdem wir über Turing-Maschinen und Unentscheidbarkeit gesprochen hatten, kramte er einige alte Veröffentlichungen zum Thema hervor und schickte uns Kopien per E-Mail. Eine war Robinsons Arbeit von 1971, die wir uns auch schon angesehen hatten. Es schien an der Zeit, die Idee mit der Unentscheidbarkeit des Pflasterungsproblems aus unseren früheren Diskussionen wieder zum Leben zu erwecken. Als wir Robinsons Arbeit erneut lasen, bemerkten wir, dass sie genau das tat, was wir brauchten, um zu verhindern, dass die Spektrallücke verschwindet.

Durchbruch bei der Klausuraufsicht

Ursprünglich wollten wir nur ein Exemplar der Turing-Maschine in den Grundzustand unseres hypothetischen Quantenmaterials abbilden. Und zwar wollten wir die Wechselwirkungen zwischen den Quantenteilchen so gestalten, dass die Energie des Grundzustands genau dann ein wenig höher ist, wenn die Turing-Maschine anhält. Die Spektrallücke – der Energieunterschied zum ersten angeregten Zustand – würde dann davon abhängen, ob die Turing-Maschine anhält oder nicht. Es gab nur ein großes Problem: Mit zunehmender Teilchenzahl wurde der an das Anhalten geknüpfte Zuwachs an Energie immer geringer und verschwand im Grenzfall unendlich vieler Teilchen ganz, wodurch das Material wieder lückenlos wurde.

Wir lösten das Problem, indem wir nicht nur eine Turing-Maschine, sondern viele identische Exemplare in den Grundzustand abbildeten. Und zwar hängten wir gewissermaßen an jede Kachel einer Robinson-Pflasterung ein Exemplar der Turing-Maschine an. Wenn eine von ihnen anhält, tun das alle; sie sind ja identisch. Also summieren sich ihre Energiebeiträge. Wenn die Anzahl der Teilchen zunimmt, wird die Zahl der Quadrate im Kachelmuster größer. Entsprechend tragen mehr Turing-Maschinen zur Gesamtenergie bei, so dass der Unterschied zwischen Halten und Nichthalten auch im Grenzwert großer Teilchenzahlen merklich bleibt. Damit rückte die Existenz einer Spektrallücke wieder in den Bereich des Möglichen.

Noch hatte unser Ergebnis allerdings eine wesentliche Schwäche. Wenn unser Material eine Lücke aufwies, konnten wir zwar beweisen, dass sie größer als null war – aber mehr auch nicht. Dagegen konnte man einwenden, dass die Lücke möglicherweise so klein sei, dass sie ebenso gut auch nicht existieren könnte. Also mussten wir beweisen, dass die Lücke, wenn sie existierte, tatsächlich groß war. Unsere erste Lösung für dieses Problem fanden wir, indem wir die dritte räumliche Dimension berücksichtigten. Bisher hatten wir uns auf Materie in zwei Dimensionen, also in einer Ebene, beschränkt.

Wenn man nicht aufhören kann, über ein mathematisches Problem nachzudenken, kommt der Durchbruch oft bei den unmöglichsten Gelegenheiten. David grübelte über den dreidimensionalen Fall, während er eine Klausur zu beaufsichtigen hatte. Geistesabwesend schlich er durch die

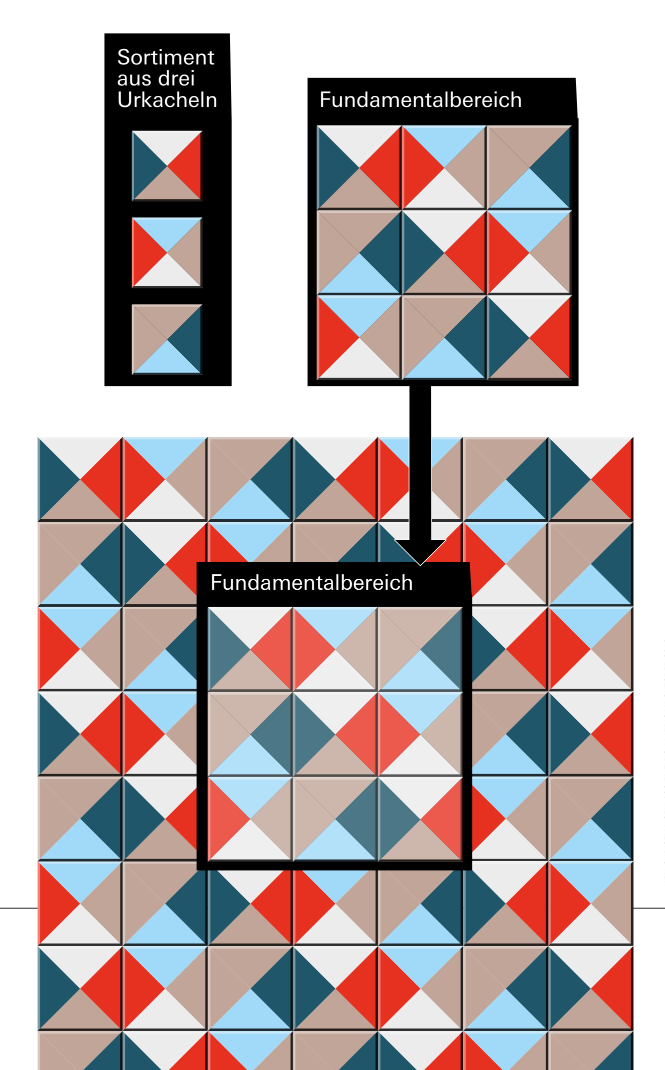
Einen unendlichen Badezimmerboden kacheln

Gegeben sei ein Sortiment von wenigen quadratischen Kacheln, die jede in unendlicher Menge vorrätig sind. Jede Seite eines Quadrats ist einheitlich gefärbt. Die Aufgabe besteht darin, die Ebene so mit diesen Kacheln zu bedecken, dass stets nur gleich gefärbte Quadratseiten aneinandergrenzen.

Abhängig vom Sortiment gibt es Lösungen der Aufgabe, die ein »periodisches«, sich ständig wiederholendes Muster bilden, und »aperiodische«, bei denen es keine solche Wiederholung gibt.

Periodische Muster

In diesem Beispiel besteht das Sortiment aus drei Urkacheln mit insgesamt fünf verschiedenen Farben. Es gelingt, aus diesem Sortiment ein Rechteck – hier sogar ein Quadrat – zu legen, dessen linke Seite dieselbe Farbfolge zeigt wie die rechte, ebenso die obere und die untere Seite. Daher kann man die ganze Ebene mit lauter Exemplaren des zusammengesetzten Rechtecks (des »Fundamentalbereichs«) bedecken.



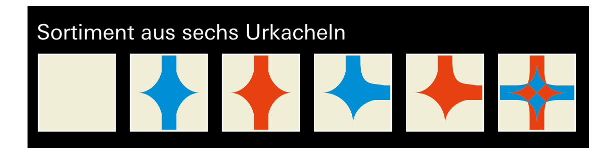
JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

Aperiodische Muster

Das hier gezeigte spezielle Kachelsortiment hat der Mathematiker Rafael Robinson 1971 entworfen. Die Anlegeregeln besagen, dass die blauen und die schwarzen Linien sich über jede Fuge hinweg in der richtigen Farbe fortsetzen sollen. Dabei darf man jede Kachel vor dem Einsetzen um Vielfache von 90 Grad drehen.

Die Kacheln passen so aneinander, dass immer größere Quadrate aus blauen und schwarzen Linien entstehen. In diesem speziellen Muster kann es also keine Parallelverschiebung geben, die das ganze unendliche Muster in sich selbst überführt; denn zu jedem Verschiebungsvektor gibt es ein noch größeres blaues oder schwarzes Quadrat, das die Periodizität vereitelt.

Es ist auch möglich, diese Fliesen in einem anderen, periodischen Muster anzuordnen, aber durch Hinzufügen weiterer Anlegeregeln entwickelte Robinson ein Sortiment von 56 Fliesen, das die Aperiodizität erzwingt.


Sortiment aus sechs Urkacheln

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Sitzreihen, während die Studierenden um ihn herum fieberhaft arbeiteten. Und als die ihre Zettel abgegeben hatten, konnte auch David diesen Teil des Beweises zu Papier bringen.

Wir wussten jetzt, dass es möglich war, ein hypothetisches Material mit einer großen Spektrallücke zu konstruieren. Waren dazu drei Dimensionen notwendig, oder könnte man auch mit zweien auskommen? Dafür mussten wir noch einmal zu unserem unendlichen Badezimmerfußboden zurückkehren. Wenn man in der klassischen Pflasterung von Robinson eine Fliese durch eine andere ersetzt, entsteht ein »Defekt«, ein Verstoß gegen die Anlegeregeln. Um diesen auszubessern, muss man die Nachbarn der »falschen« Fliese ebenfalls austauschen, dann möglicherweise deren Nachbarn und so weiter. Wir mussten beweisen, dass der Einfluss des Defekts begrenzt bleibt. Man muss also das Pflaster nur in einer kleinen Umgebung der falschen Fliese aufreißen und neu verlegen und findet unter Einhaltung der Anlegeregeln einen Anschluss an den Rest des Fußbodens. Wenn wir diese »Stabilität« von Robinsons Pflasterungen zeigen könnten, würde das bedeuten, dass eine Spektrallücke, wenn sie existiert, nicht klein sein kann.

Der optimale Platz zum Forschen: gleich neben der Kaffeemaschine

Im Spätsommer 2013 glaubten wir, dass wir auch für diesen Teil des Beweises alle Zutaten beisammen hatten. Aber immer noch war etliches zu klären, zum Beispiel ob die Stabilität der Pflasterung mit all den anderen Beweiselementen widerspruchsfrei zusammengeführt werden konnte.

Während des Herbstsemesters 2013 veranstaltete das Isaac Newton Institute for Mathematical Science in Cambridge (England) einen speziellen Workshop zum Thema Quanteninformation. Wir waren alle drei eingeladen – die perfekte Gelegenheit, das Projekt gemeinsam zum Abschluss zu bringen. Aber David konnte nicht bis zum Ende bleiben; also mussten wir uns beeilen.

Im Isaac Newton Institute gibt es überall Tafeln – sogar in den Toiletten! Für unsere Diskussionen wählten wir eine der Tafeln auf einem Flur, gleich neben der Kaffeemaschine. Dort formulierten wir in vielen Stunden die noch fehlenden Aussagen und teilten dann die Aufgabe, diese sorgfältig zu prüfen und aufzuschreiben, unter uns auf. Dieser Prozess kostet immer deutlich mehr Zeit und Mühe, als es an der Tafel den Anschein hat. Als die Zeit knapp wurde, arbeiteten wir ohne Pause den ganzen Tag und den größten Teil der Nacht. Wenige Stunden vor Davids Abreise hatten wir schließlich einen kompletten Beweis.

In Physik und Mathematik veröffentlichen die Forscher ein Ergebnis meist zuerst auf dem Preprintserver arXiv.org, bevor sie es bei einer Zeitschrift zur Veröffentlichung (und Begutachtung) einreichen. Obwohl wir von unserem Werk eigentlich überzeugt waren und der härteste Teil hinter uns lag, war unser Text noch nicht veröffentlichungsreif. Viele mathematische Kleinigkeiten und Erklärungen waren noch einzufügen. Bei der Gelegenheit wollten wir das Manuskript auch umformulieren und aufräumen, in der Hoffnung, es würde dadurch kürzer werden (was kläglich scheiterte). Zudem war zu diesem Zeitpunkt jeder Baustein des Beweises von mindestens einem von uns überprüft worden, aber keiner war die komplette Argumentationskette in allen Einzelheiten von Anfang bis Ende durchgegangen.

Im Sommer 2014 war David während eines Forschungsfreisemesters an der Technischen Universität München bei Michael. Toby schloß sich ihnen an. Während dieser Zeit wollten wir den gesamten Beweis Zeile für Zeile prüfen und in eine auch für andere lesbare Form bringen. David und Toby teilten sich ein Büro. Jeden Morgen kam David mit einem neuen Ausdruck des Entwurfs, massenhaft Notizen und Fragen, die an die Ränder und auf eingefügte Blätter gekritzelt waren. Wir drei holten uns Kaffee, machten da weiter, wo wir tags zuvor aufgehört hatten, und diskutierten den nächsten Abschnitt des Beweises an der Tafel. Am Nachmittag teilten wir wieder die Arbeit unter uns auf: einen Abschnitt umformulieren, neues Material einbauen und den nächsten Abschnitt durchgehen. Da Toby wegen eines Bandscheibenvorfalls nicht sitzen konnte, hatte er einen umgedrehten Papierkorb auf dem Tisch und darauf den Laptop, während auf Davids Tisch gegenüber der Papierhaufen aus Ausdrucken und Notizen auf ähnliche Höhe anwuchs. An ein paar Stellen fanden wir Lücken im Beweis. Diese erwiesen sich als überwindbar, aber nur mit erheblichem Aufwand, was unseren Text weiter verlängerte.

Nach sechs Wochen hatten wir jede einzelne Zeile des Beweises geprüft, vervollständigt und verbessert. Das endgültige Aufschreiben nahm weitere sechs Monate in Anspruch. Schließlich veröffentlichten wir im Februar 2015 das Paper auf arXiv.org.

Was das alles bedeutet

Was sagen uns nun diese 146 Seiten Mathematik?

Sie liefern vor allem einen strengen mathematischen Beweis dafür, dass eine grundlegende Frage der Quantenphysik im Allgemeinen nicht beantwortet werden kann. Die Einschränkung »im Allgemeinen« ist hier wichtig. Das Halteproblem ist zwar im Allgemeinen unentscheidbar, doch für bestimmte Inputs einer Turing-Maschine ist es häufig möglich zu entscheiden, ob sie anhalten wird oder nicht. Wenn zum Beispiel die erste Anweisung »halt« lautet, ist die Antwort ziemlich klar. Das Gleiche gilt, wenn die erste Anweisung die Maschine in eine Endlosschleife befördert.

Übertragen auf das Spektrallückenproblem bedeutet das: Seine Unlösbarkeit im Allgemeinen verhindert nicht, dass es für bestimmte Materialien lösbar ist, und die Physik der kondensierten Materie ist reich an Beispielen dafür. Gleichwohl zeigt das Ergebnis, dass selbst eine vollständige Kenntnis der mikroskopischen Wechselwirkungen eines Materials nicht immer ausreicht, um seine makroskopischen Eigenschaften zu bestimmen.

Das ist aber nun äußerst merkwürdig. Die Natur verhält sich so oder anders, und wir verstehen nicht immer, wie sie sich verhalten wird. Aber unser Ergebnis würde ja gewissermaßen bedeuten, dass die Natur selbst nicht weiß, wie sie sich verhalten soll. Man könnte unser hypothetisches Material im Labor herstellen – theoretisch, die Realisierung unserer äußerst komplizierten Wechselwirkungen würde unsere technischen Möglichkeiten noch lange überfordern, aber immerhin. Und dann würde man seine Spektrallücke

messen und bekäme entweder das Ergebnis »null« oder »größer als null«, aber jedenfalls nicht »weiß nicht«. Damit hätte man dann eine angeblich unbeantwortbare Frage beantwortet.

Die Auflösung dieses scheinbaren Paradoxons liegt darin, dass die Begriffe »lückenlos« und »lückenhaft« mathematisch streng nur im Grenzwert unendlich großer Materialstücke definiert sind. Nun besteht bereits ein Kubikzentimeter fester Materie größenordnungsmäßig aus etwa 10^{23} Atomen. Für gewöhnliche Materialien ist das nahe genug an unendlich, so dass zwischen der Natur und der mathematischen Idealisierung kein nennenswerter Unterschied besteht. Aber für das sehr eigenartige Material, das wir in unserem Beweis konstruieren, ist groß nicht gleichbedeutend mit unendlich. Vielleicht verhält sich ein Materialstück mit 10^{23} Atomen im Experiment wie eines ohne Spektrallücke. Nur um sicher zu sein, nimmt man eine Probe des Materials von doppelter Größe und misst wieder. Immer noch keine Spektrallücke. Dann kommt eines Nachts ein Doktorand ins Labor und fügt nur ein weiteres Atom hinzu. Am nächsten Morgen, wenn wieder gemessen wird, hat das Material plötzlich eine Spektrallücke!

Aus unserem Ergebnis folgt auch, dass die Größe, bei der ein solcher Übergang stattfinden kann, im Allgemeinen unberechenbar ist (in dem oben ausgeführten Sinn von Gödel und Turing). Diese Geschichte ist zugegeben hypothetisch, weil wir ein derart kompliziertes Material nicht herstellen können. Aber sie zeigt, gestützt auf einen mathematischen Beweis, dass man bei der Extrapolation von Ergebnissen bis ins Unendliche sehr sorgfältig vorgehen muss.

Kommen wir zurück zum Yang-Mills-Problem – der Frage, ob die Gleichungen, die Quarks und deren Wechselwirkungen beschreiben, eine Massenlücke aufweisen. Computersimulationen lassen vermuten, dass die Antwort ja ist. Unser Ergebnis dagegen zeigt, dass ein verwandtes Problem unentscheidbar ist.

Könnte es sein, dass die Computersimulation für die Yang-Mills-Massenlücke zu dem Ergebnis »nein« kommen würde, wenn wir sie nur ein wenig größer machen? Unser Ergebnis sagt darüber nichts aus, aber es öffnet die Tür zu der faszinierenden Möglichkeit, dass das Yang-Mills-Problem und andere für Physiker wichtige Fragen unentscheidbar sein könnten.

Und was ist mit dem ursprünglichen kleinen und eher unbedeutenden Problem, das wir in dem Café in Seefeld zu lösen versucht hatten? Wir arbeiten immer noch daran. ◂

QUELLE

Cubitt, T.S. et al.: Undecidability of the Spectral Gap. In: Nature 528, S. 207–211, 2018. Langfassung (146 Seiten) unter arxiv.org/abs/1502.04573

Robinson, R.M.: Undecidability and Nonperiodicity for Tilings of the Plane. In: Inventiones Mathematicae 12, S. 177–209, 1971



FREISTETTERS FORMELWELT
DIE WURSTKATASTROPHE

Wer ihr entgehen will, muss in mehrdimensionale Räume flüchten. Doch auch da ist man nicht unbedingt sicher, solange die Wurstvermutung unbewiesen bleibt.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1609518

Wenn Mathematiker von »Würsten« sprechen, reden sie meist nicht von Nahrungsmitteln, sondern beschäftigen sich mit der Theorie endlicher Kugelpackungen. Dabei geht es um die Frage, wie man eine endliche Anzahl gleich großer Kugeln möglichst Platz sparend verstauen kann. Das Problem ist nicht mit der berühmten Aufgabe zu verwechseln, ein vorgegebenes Volumen effizient mit Kugeln auszufüllen, deren Lösung ein Orangenstapel ist. Das Wurstproblem lässt sich leicht veranschaulichen: Wie muss man eine Menge von Tennisbällen anordnen, damit das Volumen der Hülle, in die sie verpackt werden, möglichst klein ist?

Üblicherweise werden Tennisbälle hintereinander aufgereiht in röhrenförmige Dosen verpackt. Diese Anordnung entspricht annähernd einer so genannten Wurstpackung, bei der die Mittelpunkte aller Kugeln auf einer Geraden liegen. Die minimale Hülle um die Bälle ähnelt dann einer Wurst, weswegen der ungarische Mathematiker László Fejes Tóth dafür den entsprechenden Ausdruck prägte. Von Tóth stammt auch die »Wurstvermutung«:

$$V^d(S_k + B^d) \leq V^d(C_k + B^d) \quad \text{für} \quad d \geq 5$$

Diese Formel beschreibt Bälle *(B)* mit nicht nur drei-, sondern auch mehr Dimensionen *(d)*. Das Konzept bleibt dabei gleich: Eine *d*-dimensionale Kugel ist die Menge aller Punkte in einem *d*-dimensionalen Raum, die den gleichen Abstand von einem gemeinsamen Mittelpunkt haben. Tóths Vermutung beschäftigt sich mit dem Volumen V^d der Packung und besagt, dass die Wurstpackung (S_k) in Räumen mit mehr als vier Dimensionen immer die beste ist – unabhängig davon, wie viele Kugeln sie enthält.

In unserer dreidimensionalen Welt ist das nicht immer so. Wir wissen, dass die Wurstpackung für drei oder vier Bälle tatsächlich optimal ist. Auch für mehr Kugeln sollte das der Fall sein, doch das ist bisher nicht einwandfrei bewiesen. Dagegen eignet sich bei 56 Kugeln eine so genannte Clusterpackung (C_k) besser, bei der die Kugeln nicht alle auf einer Geraden oder in einer Ebene liegen. Allerdings weiß man nicht, wie diese Packung im Detail aussieht. Auch für andere einzelne Anzahlen von Kugeln konnten Mathematiker beweisen, dass eine Clusterpackung optimal ist; eine allgemeine Regel fanden sie bisher jedoch nicht.

Das Problem wirkt in drei Dimensionen seltsam. Die Packungsform ändert sich schlagartig von der relativ geordneten Wurstpackung zur ungeordneten Clusterpackung, ohne dass Mathematiker verstehen, warum das so ist. In einem vierdimensionalen Raum tritt der Wechsel von der Wurst zum Cluster spätestens bei der enorm großen Anzahl von 375 370 Kugeln ein. Dieses unerwartete und ruckartige Verhalten bezeichnen Mathematiker als »Wurstkatastrophe«.

Sollte Tóth mit seiner 1975 aufgestellten Vermutung Recht haben, dann gäbe es in Räumen mit mehr als vier Dimensionen keine solche Katastrophe, da dort die Wurstpackung immer optimal ist. Ulrich Betke und Martin Henk konnten 1998 immerhin beweisen, dass die Wurstvermutung für alle Dimensionen größer als 41 korrekt ist. In einem 42-dimensionalen Raum ist man daher auf jeden Fall vor der Wurstkatastrophe sicher.

Neben Wurst- und Clusterpackungen haben Mathematiker übrigens eine weitere gastronomische Metapher auf Lager: Ordnet man Kugeln so an, dass ihre Mittelpunkte nicht auf einer Geraden, sondern – wie Pralinen in einer Schachtel – in einer Ebene liegen, dann spricht man von einer »Pizzapackung«. Mit der Wurst kann die Pizza allerdings nicht mithalten: Zumindest in allen Dimensionen kleiner als 11 ist die optimale Packung immer eine Wurst oder ein Cluster, aber niemals eine Pizza.

SPÄTANTIKE

WOHER KAMEN DIE VORFAHREN DER BAYERN?



Welche Ethnien verschmolzen einst zu den Bajuwaren, den Urahnen der Bayern? Paläogenetiker verfolgen Spuren bis weit nach Osteuropa hinein.





Die promovierte Anthropologin **Michaela Harbeck** (links) ist Konservatorin an der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie in München. **Brigitte Haas-Gebhard** ist promovierte Archäologin an der Archäologischen Staatssammlung in München. Der Anthropologe und Populationsgenetiker **Joachim Burger** lehrt und forscht am Institut für Organismische und Molekulare Evolutionsbiologie der Universität Mainz.

spektrum.de/artikel/1609520

STAATSSAMMLUNG FÜR ANTHROPOLOGIE UND PALÄOANATOMIE, MÜNCHEN

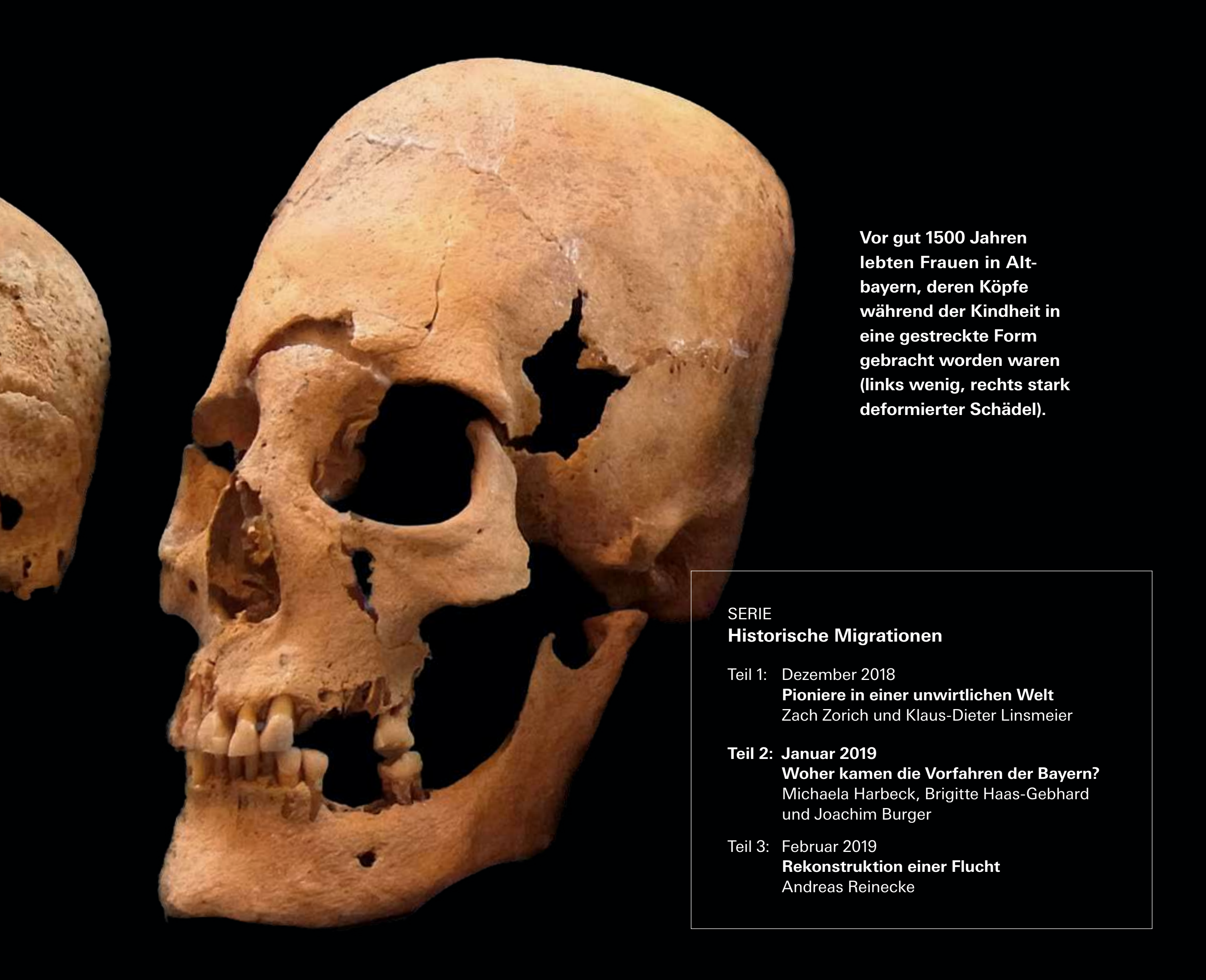
Trachtenjanker und -dirndl, Jodelgesang und Volkstanz – viele Bayern pflegen das Brauchtum. Als Vorfahren des traditionsbewussten Volks gelten die Bajuwaren, die im frühen Mittelalter in Altbayern (heute Ober- und Niederbayern sowie die Oberpfalz), Teilen Österreichs und Südtirols siedelten. Forscht man wiederum nach deren ethnischen Wurzeln, ergibt sich ein überraschend buntes Bild. Seltsam deformierte Frauenschädel aus Gräberfeldern des 5. Jahrhunderts nähren sogar den Verdacht, dass manche Vorfahrin den Hunnen angehörte (siehe »Gottes Geißel« – die Hunnen, S. 81). Paläogenetische Studien sollen Klarheit bringen.

Die Spur der Bajuwaren führt weit zurück in die Zeit der so genannten Völkerwanderung, in eine Phase der Umbrüche. Hunnische Reiterverbände haben 375 n. Chr. mit ihren Raubzügen gegen die Goten nördlich des Schwarzen Meeres eine Kettenreaktion ausgelöst. Allenthalben dringen nun »barbarische« Stämme auf der Suche nach einer neuen Heimat in das Imperium Romanum ein, Ende des 5. Jahrhunderts gehen Teile der Provinz Raetia zwischen Alpen, Donau, Lech und Inn verloren. Damit beginnt dort aus Sicht der modernen Forschung ein dunkles Zeitalter. Denn es gibt weder eine weltliche noch eine kirchliche Verwaltung und somit niemanden, der die Ereignisse dokumentiert. Licht bringen archäologische Grabungen und neuerdings auch Analysen alter Erbsubstanz sowie Isotopenmessungen.

Erst Venantius Fortunatus, Bischof im westfranzösischen Poitiers, erwähnt die Region in der Beschreibung einer Pilgerreise Mitte des 6. Jahrhunderts erneut. Seine Bewohner nennt er »baiuvarii« und beschreibt sie als Fremden gegenüber wenig freundliche Zeitgenossen: Man könne ihr Land nur bereisen, »se non baiovarius te obstat«, wenn einem keiner aus diesem Volk entgegentritt.

Sieg über Attila

Aus anderen Teilen des Imperiums kennen wir den Verlauf der Geschichte dank der überlieferten Schriften deutlich besser. 451 schlug eine Koalition aus Römern, Westgoten und anderen germanischen Verbänden das gleichfalls bunt gemischte Heer des legendären Attila in der Schlacht auf



Vor gut 1500 Jahren lebten Frauen in Altbayern, deren Köpfe während der Kindheit in eine gestreckte Form gebracht worden waren (links wenig, rechts stark deformierter Schädel).

SERIE
Historische Migrationen

den Katalaunischen Feldern. Der Hunnenkönig zog sich in sein Kerngebiet in Ungarn zurück. Das hielt allerdings den Untergang Roms nicht auf: 476 stieß Odoaker, Offizier des Imperiums und germanischer Heerführer in Personalunion, den letzten weströmischen Kaiser vom Thron. Bald darauf, 493, errangen die Ostgoten unter König Theoderich die Herrschaft über Italien und einige Provinzen, darunter Raetia. Altbayern bildete nun die nördliche Grenze des Ostgotenreichs. Gut 50 Jahre später beendete das byzantinische Reich diese Episode. In Gallien gewann die fränkische Königsdynastie der Merowinger ab dem späten 5. Jahrhundert mehr und mehr an Einfluss. Kurz: Die Spätantike war in das Frühmittelalter übergegangen, auf einst römischem Boden herrschten germanische Anführer, fühlte man sich als Franke, Alemanne oder Thüringer.

Archäologische Funde zeigen, dass nach dem Abzug der Römer zumindest ehemalige urbane Zentren wie Castra Regina (Regensburg) oder Augusta Vindelicorum (Augsburg) weiterhin bewohnt waren. Wahrscheinlich überdauerten auch noch etliche kleinere Ansiedlungen. Allerdings war

AUF EINEN BLICK
RÄTSELHAFTE SCHÄDELFORM

1 Im Zuge der Völkerwanderung entstand der Stamm der Bajuwaren. Welche Rolle dabei einheimische Gruppen spielten und welche »Barbaren« wie die Hunnen, lässt sich bislang nicht nachvollziehen.

2 Jetzt haben Forscher 35 Skelette des 5. Jahrhunderts v. Chr. paläogenetisch untersucht. Demnach stammten die meisten Bestatteten aus Zentraleuropa, doch es gab Ausnahmen.

3 Insbesondere kamen Frauen mit länglich geformten Schädeln – das Resultat einer gezielten Verformung in Kindertagen – aus Osteuropa. Ob sie hunnischen Verbänden angehörten, ist jedoch noch offen.

die Region tatsächlich deutlich dünner besiedelt, und ihre Bewohner mussten sich mit einem bescheideneren Lebensstandard zufriedengeben. Statt großer landwirtschaftlicher oder handwerklicher Betriebe prägten kleinere, weitgehend autarke Siedlungseinheiten das Land.

Das mag eine Anpassung an die neuen Verhältnisse gewesen sein: Die kriegerischen Auseinandersetzungen hatten Menschenleben gekostet, die verbliebenen Einwohner konnten kleinere Siedlungseinheiten besser verteidigen, zudem benötigten sie weniger Nahrungsmittel und andere Güter, für sich selbst und für die Versorgung der römischen Soldaten. Doch änderten sich auch kulturelle Merkmale: Weibliche Tote erhielten auffällig reiche Beigaben, bisweilen sehr wertvollen Schmuck, während Männer meist nur mit Gürtel und Gürteltasche, selten mit einer Waffe ihre letzte Reise antraten.

Angesichts solcher Befunde überrascht es nicht, dass Experten bis heute kontrovers über die ethnische Zusammensetzung der »Proto-Bajuwaren« diskutieren. Im Mittelalter leitete man den Namen vom keltischen Stammesnamen der Boier ab, der auch in der Landschaftsbezeichnung Böhmen steckt, eines Teils des heutigen Tschechiens. Doch die Lautverschiebung vom »o« zum »a« können Linguisten nicht erklären. Das zweite Glied »-ware« beziehungsweise lateinisch »-varii«, so vermuteten Forscher im 19. Jahrhundert, habe indogermanische Wurzeln und bedeute »Bewohner«. Die Vorfahren der Bajuwaren seien demnach »Männer aus Böhmen« gewesen.

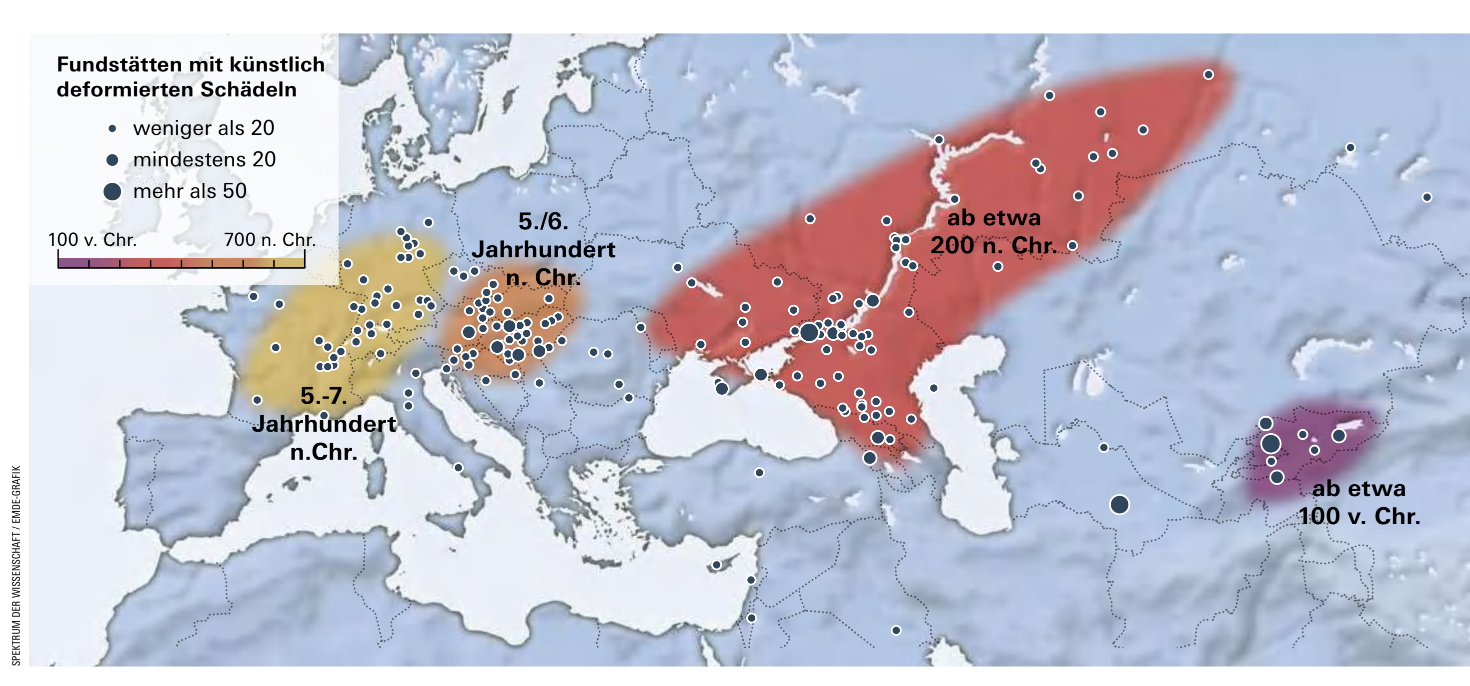
Inzwischen ist zwar erwiesen, dass sich »varii« vom indogermanischen »wueren« herleitet, das »wohnen« sowie »abwehren« bedeutete und heute noch im englischen »war«, »Krieg«, steckt. Doch in den Gräberfeldern Südbayerns geborgene Gewandspangen verweisen in Form und Stil nicht nur Richtung Böhmen, sondern auch in das fränkische Reich und in das des Theoderich. Ob diese Schmuckstücke aber im Gepäck von Einwanderern oder von Händlern ins Land kamen, lässt sich an ihnen nicht ablesen. Die Beigabe von Keramikgefäßen, die Archäologen sonst gute Hinweise auf die kulturelle Zugehörigkeit eines Verstorbenen geben, gehörte im protobajuwarischen Alpenraum offenbar selten zum Bestattungsritual.

Eine exotisch anmutende Fundkategorie südbayrischer Gräberfelder steuert aber einen weiteren Aspekt bei: Ab etwa 500 lebten Frauen in der Region, deren Köpfe im Kindesalter in eine längliche Form gebracht worden waren. Erstmals erwähnte der griechische Arzt Hippokrates (etwa 460 – 370 v. Chr.) dergleichen in seiner Schrift »Über Luft, Wasser und Orte«, doch im Zusammenhang mit einem Volk weit im Osten Altbayerns. Die Makrokephalen, zu Deutsch Langköpfe, lebten demnach am Mäotischen Meer, einem Binnenmeer zwischen der heutigen Ukraine und Russland. »Gleich wenn das Kind geboren wird, formen sie seinen Kopf, solange er noch weich ist, mit den Händen und zwingen ihn, in die Länge zu wachsen, indem sie Bandagen und geeignete Vorrichtungen anlegen.« Als Grund nannte der Gelehrte, dass die Makrokephalen »die Menschen, die einen besonders langen Kopf haben, für die vornehmsten halten«.

Der Wunsch, anders zu sein

Letztlich kam dieses Schönheitsideal auf allen Kontinenten irgendwann einmal auf. Beispiele für die jüngere Vergangenheit sind die Mangbetu im Kongo und Ureinwohner der Karibik. Ethnologen bestätigen die von Hippokrates beschriebene Technik und ergänzen bei den Hilfsmitteln noch eng geschnürte Hauben, Bretter und sogar Steine. Meist beginnt die Prozedur wenige Tage nach der Geburt und

Langgezogene »Turmschädel« kamen im vermeintlichen Ursprungsgebiet der Hunnen in Zentralasien auf. Mit deren Expansion verbreitete sich die Sitte nach Westen, doch die Fundzahlen dokumentieren, dass sie dabei immer seltener gepflegt wurde.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

»Gottes Geißel« – die Hunnen

Über nahezu 7000 Kilometer erstreckt sich der eurasische Steppenraum, von der Ungarischen Tiefebene bis in den Nordwesten des heutigen China. Die Landschaft ist dementsprechend vielfältig: Grassteppen gehen in Wüsten über, bewaldete Ebenen werden von Gebirgen durchbrochen. Um die kargen Ressourcen vor allem der weiten Ebenen optimal zu nutzen, lebten ihre Bewohner seit dem 1. Jahrtausend v. Chr. als Reiternomaden (siehe **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 4/2017, S. 42): Man wohnte in zeltartigen Behausungen oder schnell auf- und abbaubaren Blockhütten, lebte in patriarchalisch strukturierten Großfamilien zusammen und konzentrierte kulturelle sowie technische Entwicklungen auf die Pferdezucht und das Reiten.

Streit um Weiderechte und Konflikte mit den sesshaften Bewohnern der Oasen förderten dabei die militärische Ausrichtung. Das zeigte sich insbesondere an Pfeil und Bogen: Für die Jagd erfunden, wurde daraus eine Präzisionswaffe mit hoher Durchschlagskraft, die sich auch aus vollem Galopp abfeuern ließ. Im Kriegsfall oder für einen Raubzug gegen einen mächtigen Gegner bildeten die Großfamilien größere Verbände, die unter charismatischen Anführern erhebliche Schlagkraft entwickelten.

Aus dem weiten Steppenraum stießen diese immer wieder gen China und in die Mitte des europäischen Kontinents vor. Antike Autoren schrieben so stereotyp, als hätten sie einander kopiert, von einem bestialischen Äußeren und extremer Grausamkeit. So liest man bei Ammianus Marcellinus, einem römischen Schriftsteller des 4. Jahrhunderts, über die Hunnen: »Wie Tiere, die keinen Verstand haben, kennen sie keinen Begriff von Ehre und Ehrlosigkeit.«



BPK / RHEINISCHES BILDARCHIV KÖLN / ANJA WEGNER

Die »Krone von Kertsch« war das Diadem einer möglicherweise hunnischen Vornehmen, die bei Kertsch, dem antiken Pantikapaion, auf der Krim im späten 4. oder frühen 5. Jahrhundert beigesetzt wurde.

Die so beschriebenen Verbände stießen im 4. und 5. Jahrhundert so weit nach Westen vor wie keine anderen zuvor. Etwa 374 n. Chr. überrannten die Hunnen das Alanen-Reich im Gebiet von Wolga und Kaukasus. »Sie erschlugen und beraubten viele und vereinigten sich mit den übrigen durch ein Beistandsbündnis«, berichtete Marcellinus. Letztere Strategie verfolgten die Anführer langfristig, so dass die hunnischen Kampfeinheiten schließlich aus vielen Völkern bestanden.

Roms Schmach

Als sie auch das Reich der Ostgoten in der nördlichen Schwarzmeerregion angriffen, lösten sie eine Fluchtwelle nach Westen aus. Ein Versuch, die Migranten von seinen Grenzen fernzuhalten, mündete 378 in der Schlacht bei Adrianopel (heute Edirne) in der größten Niederlage des römischen Reichs seit der Varusschlacht.

Kurz nach 400 erstreckte sich der hunnische Einflussbereich bis in den unteren Donauraum, was weitere Ausweich- und Fluchtaktionen auslöste. Während der nur von 444/445 bis 452 dauernden Alleinherrschaft Attilas – der als ehrenvoller König Etzel in der Nibelungensage, hingegen als Geißel Gottes in kirchlichen Märtyrerlegenden dargestellt wurde – stießen Truppen von seinem Herrschaftszentrum in der ungarischen Puszta weit bis nach Italien und Gallien vor.

Zur Finanzierung dieser Expansion dienten Schriftquellen zufolge vor allem Beute und Erpressungsgelder. Der Bonner Archäologe Michael Schmauder schätzt, dass das römische Reich insgesamt 6500 Kilogramm Gold entrichtete. Kostbare Hort- und Grabfunde aus hunnischen Siedlungen bestätigen solche Berichte.

Spätestens mit der Konsolidierung des Reichs im Karpatenbecken und der Integration sesshafter Bevölkerungsgruppen geriet die nomadische Lebensweise allmählich in den Hintergrund. Schriftquellen berichteten von festen Wohngebäuden in Attilas Residenz und von Märkten, auf denen römische Händler Luxusgüter gegen Pferde und Sklaven eintauschten. Doch da hatte das Großreich bereits seinen Höhepunkt überschritten: Weil es nach wie vor durch familiäre Strukturen organisiert und an charismatische Anführer gebunden war, zerbrach es innerhalb weniger Jahre nach Attilas Tod.

dauert einige Wochen, mitunter aber auch Monate bis Jahre, je nach gewünschter Ausprägung der Deformation. Als Motiv machten Forscher vor allem den Wunsch nach einer sichtbaren Andersartigkeit aus, um beispielsweise soziale oder ethnische Unterschiede deutlich zu machen. Falls der Eingriff gesundheitsschädliche Auswirkungen hatte, waren diese entweder nicht zu spüren oder im Vergleich zum erhofften Zugewinn akzeptabel.

Dies gilt auch für die mit über 60 Jahren verstorbene Frau, deren künstlich verformter Schädel in Altenerding bei München gefunden wurde (siehe Bild S. 79, rechter Schädel). Sie war eine von mehr als 1500 Toten, die seit etwa 450 bis in die erste Hälfte des 6. Jahrhunderts dort in der Nähe einer alten römischen Nekropole beigesetzt wurden; vermutlich lag eine bislang unentdeckte größere Siedlung ganz in der Nähe. Bei den Ausgrabungen zwischen 1965 und 1973 kamen als Beigaben eine abgenutzte silberne Fibel, ein kleines Messer und ein hübscher Kamm mit feiner Zähnung zum Vorschein (siehe Bild unten). Auch wenn der Gewandverschluss laut Stilvergleichen aus Böhmen und Niederösterreich stammen könnte, belegt dieser Einzelbefund noch keine Migration.

Das gilt auch für eine Frau mit absichtlich verlängertem Schädel, die bei Alteglofsheim nahe Regensburg abseits der Gräberfelder bestattet worden war. Diese Absonderung könnte zwar ein Hinweis auf eine Fremde sein, ebenso eine Fibel, die ein erstaunlich ähnliches Gegenstück in einem Frauengrab auf der Krim hat. Doch ein Armreif entspricht dem üblichen Kulturgut der provinzialrömischen Bevölkerung Raetiens. Zugewandert oder alteingesessen – die Indizienlage ist auch hier noch zu dünn für eine Entscheidung.

Schädeldeformationen untersuchte der Frühmittelalterarchäologe Joachim Werner (1909 – 1994) an der Universität München. Demnach kam dieser Brauch im 1. bis 2. nachchristlichen Jahrhundert in Zentralasien auf und verbreitete sich im 2. und 3. Jahrhundert bis an die untere Wolga, in das Dnjepr- und Dnjestr-Flussgebiet sowie entlang des Kaspischen Meers (siehe Karte S. 80). Gegen Ende des 4. Jahrhunderts drang die Sitte weiter gen Westen, in der ersten Hälfte des 5. Jahrhunderts erfolgte eine erneute Ausbreitung, wie Funde belegen. Dieses Muster entspricht ungefähr den aus historischen Quellen bekannten Eroberungszügen der Hunnen. Daher assoziieren viele Archäologen Funde verlängerter Schädel in Europa mit dieser Expansion, zumal in Osteuropa wesentlich mehr davon entdeckt wurden. Im Westen handelt es sich um Ausnahmen, die sich in Bayern, Böhmen, Mitteldeutschland, dem Rheintal und rund um den Genfer See konzentrieren.

Einige Forscher glauben, dass Teile der einheimischen Bevölkerung das fremde Schönheitsideal übernahmen. Als die beiden Frauen aus Altenerding und Alteglofsheim geboren wurden, waren die Hunnen auf dem Höhepunkt ihrer Macht. Unterzogen Eltern ihre Töchter der Prozedur, um ihnen Zugang zur Elite ihrer Zeit zu verschaffen? Andere Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Betreffenden aus östlicheren Gebieten in das Alpenvorland eingewandert waren.

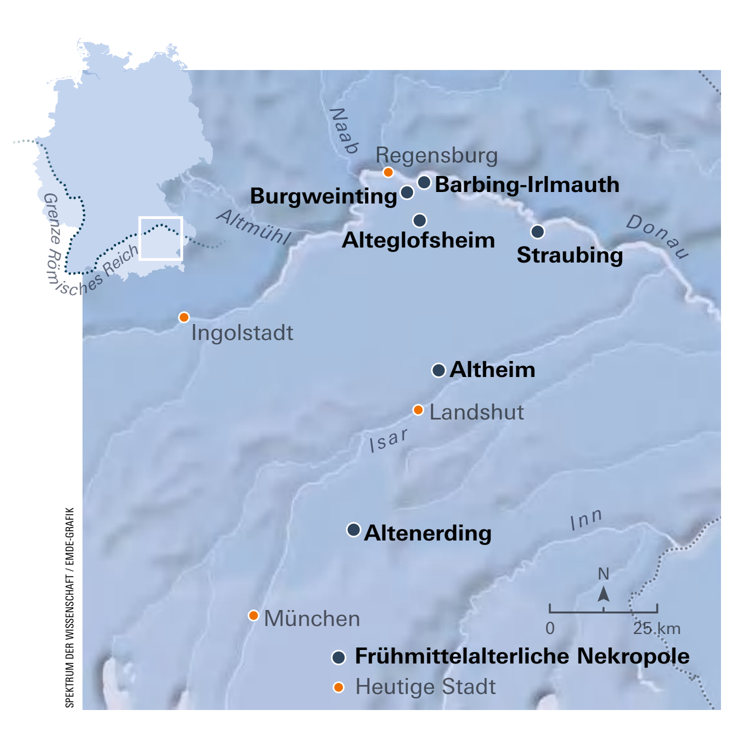
Genetische Profile der Migration

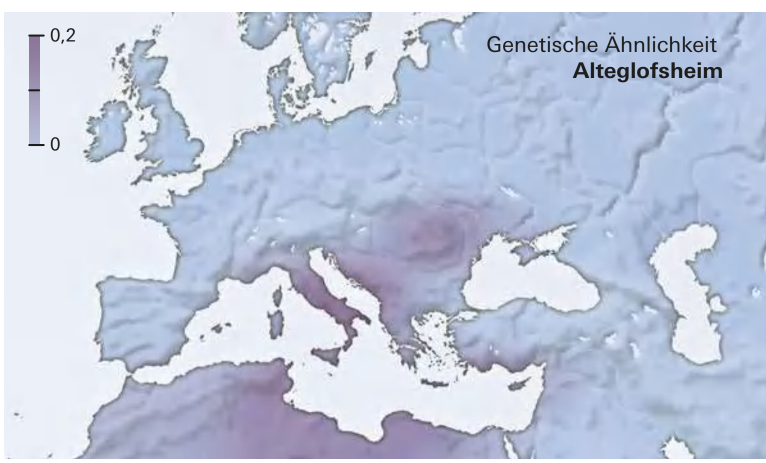
Seit 2013 hat ein internationales Forscherteam rund um die Autoren die archäologischen und anatomischen Befunde erneut analysiert. Um dem Phänomen auf den Grund zu gehen, wurden zudem umfassende DNA-Profile der Verstorbenen mittels neuester Techniken erstellt. Knochenproben lieferten Millionen genetischer Merkmale, anhand derer sich nicht allein das äußere Erscheinungsbild, sondern indirekt auch Migrationswege rekonstruieren lassen. Denn Menschen gleicher Kultur und Sprache finden Ehepartner eher untereinander als in weit entfernten Kulturkreisen. Zeigen Individuen eines bestimmten Gräberfelds also ein signifikant anderes genetisches Muster als die Mehrzahl der Bestatteten, ist Zuwanderung eine sehr plausible Deutung.

Das Team ermittelte diese Daten für 35 Frauen und Männer, die um 500 auf sechs Gräberfeldern der ehemaligen Provinz Raetia

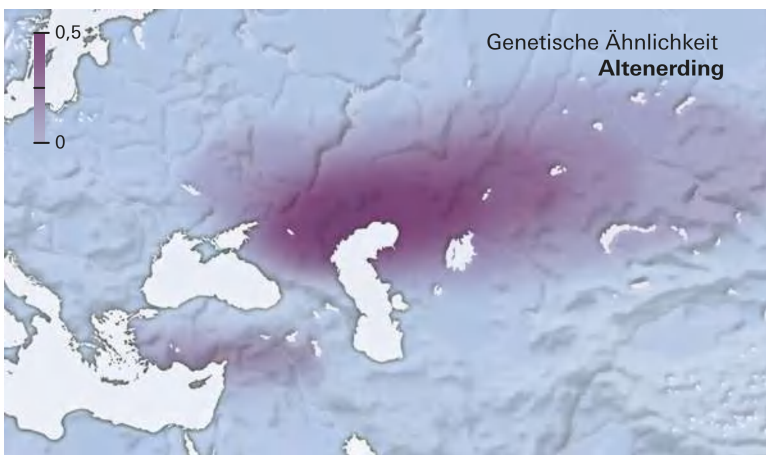


Das Grab der »Turmschädel-Frau« aus der Nekropole Altenerding enthielt einige für die Zeit kostbare Beigaben wie einen Knochenkamm, eine silberne Gewandspange und ein eisernes Messer.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



Teile des heutigen Bayern gehörten in der Antike zum Römischen Reich, in der Spätantike wanderten »barbarische« Völker ein und bildeten die Protobajuwaren. Mit paläogenetischen Analysen erkunden Forscher die mögliche genetische Herkunft der in ausgewählten Nekropolen (Karte oben) bestatteten Frauen mit deformierten Schädeln. So hatte eine auf dem Gebiet der heutigen Gemeinde Alteglofsheim beigesetzte Frau wohl Verwandte im Mittelmeerraum, während eine andere aus der Gegend des heutigen Altenerding Vorfahren in Zentralasien hatte.

bestattet worden waren. Vergleiche mit den genetischen Signaturen heutiger Bevölkerungsgruppen möglicher Herkunftsländer verweisen die meisten der »Probanden« nach Nord- und Zentraleuropa. In einem zweiten Schritt rekonstruierten die Forscher anhand anderer DNA-Abschnitte äußerliche Charakteristika. Demnach hatten diese Menschen blonde Haare und blaue Augen. Zu den Ausnahmen gehörte eine Frau aus einem Gräberfeld bei Straubing mit braunen Augen und dunklen Haaren. Sie kam entweder selbst aus dem östlichen Mittelmeerraum oder hatte Vorfahren dort gehabt.

Die neun Frauen mit künstlich deformierten Schädeln gehörten aber zu einer deutlich anderen Gruppe. Ihre genetischen Signaturen verwiesen nach Südosteuropa und ähnelten meist jenen heutiger Rumänen oder Bulgaren. Sie waren aber heterogener als die der großen Gruppe. Beispielsweise lebten Vorfahren der Altenerdinger Frau in den Steppengebieten nördlich des Kaspischen Meeres. Die Augenfarbe aller neun war braun gewesen, die Haarfarbe bis auf eine blonde Ausnahme dunkel. Es besteht somit kein Zweifel: Die Frauen mit den länglich geformten Schädeln waren keine Nachkommen der ursprünglichen Bevölkerung, sondern Migrantinnen. Sie kamen wohl, um zu heiraten – es gibt bislang nur Erwachsene mit dieser Deformation.

Ob die Frauen allerdings Hunninnen waren, ist kaum zu bestimmen. Zwar besaßen manche der Untersuchten mehr asiatische Vorfahren, als es bei heutigen Europäern der Fall ist, doch handelt es sich dabei um einen zu kleinen Anteil, um die Hunnenhypothese zu stützen. Die einzige Ausnahme ist jene Frau aus Altenerding, bei der bis zu 50 Prozent der Vorfahren Asiaten gewesen sein könnten. Für die anderen lässt sich über den generellen Migrationshintergrund hinaus auf Grund der heterogenen Signaturen lediglich sagen, dass sie entweder aus verschiedenen Regionen des Kontinents einwanderten oder aus nur einer Bevölkerung, die aber ihrerseits ein Migrantengemisch war.

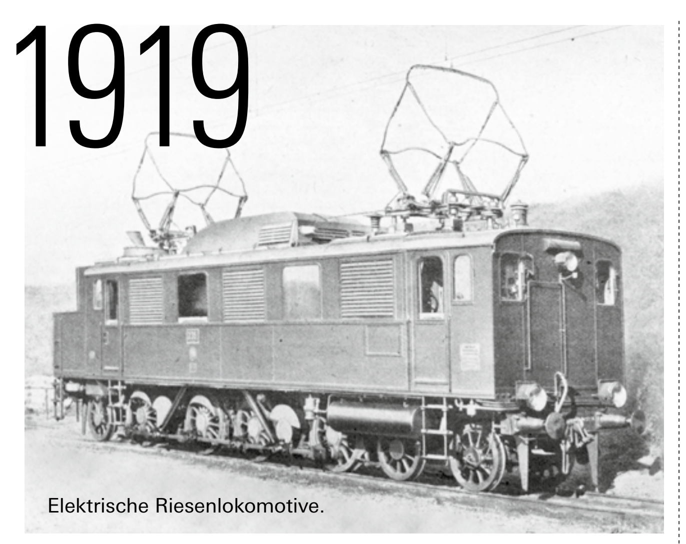
Mit immer feineren Studien will das Team nun herausfinden, welchen genetischen Beitrag die Frauen mit den deformierten Schädeln bei den heutigen Bayern hinterlassen haben. Ihre Grabbeigaben weisen darauf hin, dass sich diese Zuwanderer trotz ihrer Andersartigkeit gut integriert hatten: Sie lassen sich von anderen kulturell kaum unterscheiden. ◂

QUELLEN

Veeramah, K.R. et al: Population Genomic Analysis of Elongated Skulls Reveals Extensive Female-Biased Immigration in Early Medieval Bavaria. In: Proceedings of the National Society of America 115, S. 3494–3499, 2018

Werner J.: Beiträge zur Archäologie des Attila-Reiches. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München 1956

1919


Elektrische Riesenlokomotive.

ELEKTRIFIZIERUNG DER BAHN

»Eine elektrische Riesenlokomotive ist auf der Probestrecke Königszelt-Fellhammer erprobt worden, die höchste Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Lokomotiven stellt. Die bisherigen Ergebnisse haben wiederholt die vertraglichen Leistungen weit übertroffen. Der Motor der Lokomotive ist bei einem Gewicht von 22 t und einer Leistung von 3000 PS der weitaus stärkste, bisher gebaute Bahnmotor.« *Die Umschau 1, S. 13*

GETARNTE, STEINHARTE BIENENHÄUSCHEN

»Die Bauten der Mörtelbiene sind den Einflüssen von Wind und Wetter beständig ausgesetzt und müssen demzufolge eine größere Haltbarkeit besitzen. Die kleine Baumeisterin benutzt dazu Mörtelstückchen oder Erde mit Sand und Kieselsteinen gemischt, die sie mit ihrem klebrigen Speichel so fest zusammenkittet, daß daraus eine steinharte Masse entsteht. Die Bauten zeigen auch oft eine überraschend vollendete Farbenanpassung an ihre Unterlage, so daß sie aus größerer Entfernung dem Auge kaum bemerkbar sind.« *Kosmos 1, S. 28*

BOOTE NACH DEM VORBILD DER NATUR

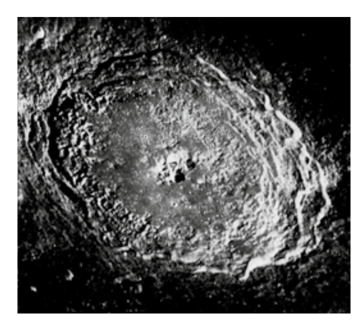
»Das ganze Gebiet der Biotechnik wird erst die Wissenschaft des kommenden Jahrhunderts beschäftigen. Unbewußt und ohne seine Vorbilder in der Natur zu kennen, hat der Mensch bereits zahllose ›Biotechniken‹ geschaffen. So haben die Ureinwohner der Südseeinseln ihre merkwürdigen Auslegerboote erfunden, um sich in dem ewig bewegten Wasser ihrer brandungsreichen Küsten vor Schiffbruch zu schützen. Auch die kleinen, zeitlebens schwimmenden Krebschen, sogar im Meere treibende Kleinpflanzen wenden das gleiche Prinzip an und strecken Ausleger in Gestalt langer Fortsätze, Schaufeln und Borsten aus.« *Prometheus 1525, S. 126–127*

1969

DIE DUNKLE SEITE DES MONDES

»Der Flug zum Mond, den die drei Astronauten Borman, Lovell und Anders in den vergangenen Weihnachtstagen unternommen haben, hat uns mit höchster Bewunderung erfüllt. Nun erhalten wir die ersten Photos. Das obere Bild zeigt einen Ausschnitt von der Mondrückseite. Das untere den Krater Langrenus. Er hat einen Durchmesser von 140 Kilometer.« *Die Umschau 2, S. 58–59*


Bizarre Mondlandschaften.



BEWEGUNGSPROFIL VON LACHSEN

»Eine englische Forschergruppe hat damit begonnen, die Wanderung von Lachsen mit Hilfe eines Computers zu untersuchen. Auch über den für die Fischwanderung in den Flüssen erforderlichen durchschnittlichen Wasserspiegel wurden Befunde erhalten. Offenbar benötigen Wanderfische tieferes Wasser als andere Fische. Die Kenntnis über die erträgliche minimale Wassertiefe ist wichtig, da es davon abhängt, wieviel Wasser von solchen Flüssen für Städte und Industriezwecke entnommen werden darf.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 28*

PRÄKOLUMBISCHER JADEHANDEL

»Während sich figürlich gestaltete Objekte aus Jade in Mexiko und Mittelamerika zumindest seit 800 v. Chr. einer großen Beliebtheit erfreuen, war das Rohvorkommen dieser Mineralien in diesem Raum bis heute fast unbekannt. Abgerollte Jadekiesel wurden bei La Herradura in Costa Rica und Abfall von Jadebearbeitung in der Nähe von Caña Dulces im Nordwesten des Landes gefunden. Es handelt sich bei den Bruchstücken um die bläuliche ›Jade‹-Varietät, die besonders in der Frühzeit der La Venta-Kultur der mexikanischen Golfküste (etwa 800–400 v. Chr.) beliebt war. Daher liegt die Vermutung nahe, daß die ›Olmeken‹ Jade aus Costa Rica bezogen.« *Die Umschau 3, S. 89*

Spektrum DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ! Ausgewählte **Spektrum KOMPAKT** gibt es auch im Printformat!

€ 4,99 je Ausgabe













Bestellmöglichkeit und mehr als 200 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt

UNSPLASH / FANNING TSENG (https://unsplash.com/photos/E44CYHQUl1c); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

REZENSIONEN



URS MÖCKLI / SAURIERMUSEUM AATHAL, AUS: ANDREAS HONEGGER, URS MÖCKLI: DAS GEDÄCHTNIS DER BÄUME. SAMMLUNG HANS-JAKOB SIBER, SCHWEIZ. MIT FRDL. GEN. DES VERLAGS ELISABETH SANDMANN, MÜNCHEN 2018

Dieses verkieselte Holzstück stammt aus dem Virgin Valley in Nevada, USA. Es ist mit Edelopal umhüllt, 40 Millionen Jahre alt und 4 mal 3 mal 2,8 Zentimeter groß.

URS MÖCKLI / SAURIERMUSEUM AATHAL, AUS: ANDREAS HONEGGER, URS MÖCKLI: DAS GEDÄCHTNIS DER BÄUME. SAMMLUNG HANS-JAKOB SIBER, SCHWEIZ. MIT FRDL. GEN. DES VERLAGS ELISABETH SANDMANN, MÜNCHEN 2018

PALÄOBOTANIK

BÄUME ZU BUNTEN STEINEN

Kaum zu glauben, aber: Selbst hunderte Millionen Jahre alte Hölzer haben sich bis heute als versteinerte Fossilien erhalten.

Überflutungen oder Ascheregen von Vulkanausbrüchen haben vor langer Zeit dafür gesorgt, dass Bäume oder ganze Wälder versteinerten und bis heute als Fossilien erhalten geblieben sind. Waren die Gewächse einmal mit Schlamm oder Asche bedeckt, drang nach und nach Siliziumdioxid in die Holzstruktur ein, und sie verwandelten sich in Gestein. Die ursprünglichen Zellstrukturen blieben dabei so deutlich erhalten, dass die Pflanzenart bis heute bestimmt werden kann. Auf diese Weise formte sich das Holz nicht nur in Schmuckstücke in den kristallinen Quarzformen von Opalen oder Achaten um, sondern überdauerte viele Jahrmillionen lang als Zeugnis der Umweltbedingungen in ferner Vergangenheit. Die ältesten Fundstücke von Bäumen wie *Archaeopteris* sind bis zu 400 Millionen Jahren alt – Dinosaurier lebten damals noch nicht. Aus ihnen lässt sich auf die damaligen Biotope schließen, aber auch auf das erreichte Lebensalter und die ursprüngliche Größe der jeweiligen Pflanze.

Andreas Honegger, Textautor, und Urs Möckli, Fotograf, haben diesen Bildband verfasst, in dem sie die fossilen Hölzer als Stein gewordene Erinnerungen an früheres Leben bezeichnen. Sie brauchten für die meisten Aufnahmen nicht weit zu reisen, da die entsprechenden Objekte sich überwiegend im Schweizer Sauriermuseum Aathal befinden, genauer in der Dauerausstellung »Wunderwerk fossiles Holz« mit Stücken aus aller Welt.

Die Autoren haben die Kapitel des farbenprächtigen Bands nach ausgewählten Fundstätten geordnet. Je nach Land erzählen sie unterschiedliche Geschichten zu den Hölzern. So steht in Madagaskar der wirtschaftliche Aspekt im Vordergrund: Von dort darf fossiles (und bearbeitetes) Holz exportiert werden – im Gegensatz zu den meisten anderen Staaten, in denen es geschützt ist. Auf Madagaskar gehen deshalb viele entsprechende Objekte für die Forschung verloren, bieten aber eine wichtige Einnahmequelle für die Bevölkerung. Die Menschen transportieren das reichlich vorhandene Material mit Lastwagen zu zentralen Sammelstellen und verarbeiten es unter anderem zu Salontischen oder Waschbecken. Damit die versteinerten Hölzer wie Schmuckedelsteine schimmern, ist



Andreas Honegger, Urs Möckli
DAS GEDÄCHTNIS DER BÄUME
Versteinerte Hölzer – Erinnerte Spuren
Elisabeth Sandmann, 2018
128 S., € 49,95

viel Arbeit nötig. Die Scheiben müssen mit großem Aufwand geschnitten und poliert werden, da sie erheblich schwerer zu sägen sind als Granit.

In Arizona dagegen, etwa im Petrified-Forest-Nationalpark, ist es verboten, jegliches versteinerte Holzstück aufzulesen. Diese seit 1906 geschützte Region liegt im Südosten der USA und weist ausgedehnte Fundstätten von Fossilien auf. Von hier stammen die schönsten farbigen Baumscheiben wie das Regenbogenholz mit einem Spiel intensiver Rottöne. Andere Färbungen entstehen durch Chromoxid, das grün und blau schimmernde Kolorite erzeugt.

Im Kapitel »Holz aus allen Erdteilen« stellen die Autoren Fundorte entsprechender Fossilien in Europa und Deutschland vor. Dazu gehören die fossilen Hölzer vom Kyffhäuser in Thüringen, einem der ältesten versteinerten Wälder Deutschlands, oder der petrifizierte Wald unter der Stadt Chemnitz, der 290 Millionen Jahre alt ist.

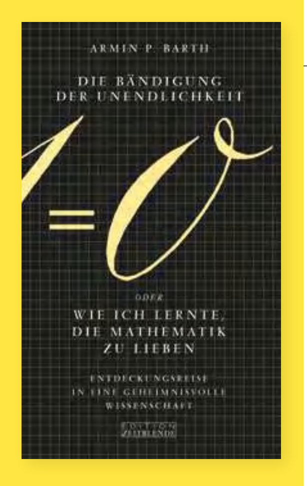
Kurz gehen die Autoren auch auf noch lebende alte Bäume ein, etwa Ableger bestimmter einzelner Gewächse, die seit Jahrtausenden austreiben. Im letzten Kapitel liefern sie einen Überblick über die Pflanzenentwicklung während der Erdgeschichte.

Die Schönheit der zu Stein gewordenen Bäume setzen die Autoren hervorragend in Szene. Auf den hochwertigen Abbildungen strahlt den Leser die Farbenpracht der fossilen Baumscheiben von Gelb, Orange, Rot oder Blau in allen Abstufungen an. Wer sich in den Erdzeitaltern wie Devon oder Silur nicht so genau auskennt, kann dies auf einer anschaulichen Zeitskala für die zurückliegenden 500 Millionen Jahre nachlesen. Sonst haben die Texte einen eher geringen Anteil an dem Werk; der großformatige Band mit seinen fast 30 mal 30 Zentimetern ist überwiegend optisch ein Genuss.

Die Rezensentin Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

MATHEMATIK
NÜCHTERNHEIT UND ÄSTHETIK

Von Wissenschaftsgeschichte über Alltagsanwendungen bis zur Schönheit des Fachs behandelt dieses Buch zahlreiche Aspekte der Mathematik.



Armin P. Barth
DIE BÄNDIGUNG DER UNENDLICHKEIT ODER WIE ICH LERNTE, DIE MATHEMATIK ZU LIEBEN
Entdeckungsreise in eine geheimnisvolle Wissenschaft
Edition Zeitblende, Aarau 2018
204 S., € 42,–

Der Autor Armin P. Barth unterrichtet seit mehr als 30 Jahren Mathematik an einem Schweizer Gymnasium und ist seit längerer Zeit als Fachdidaktikdozent für Mathematik an der ETH Zürich tätig. Zehn Jahre lang versuchte er zudem, mit monatlichen Beiträgen in verschiedenen Schweizer Zeitungen sein Publikum für Mathematik zu interessieren; eine Sammlung jener Artikel lässt sich auf seiner Homepage einsehen. Die Expertise und das Anliegen des Autors spürt man in diesem Buch, dessen 13 Kapitel einige Themen aufgreifen, mit denen sich Barth bereits in seinen Zeitungsbeiträgen beschäftigt hat.

Dem Ziel der Reihe »Edition Zeitblende«, »schön gestaltete, gut gedruckte Bücher« zu veröffentlichen, wird das Werk durchaus gerecht. Ungewöhnlich ist das Format mit zirka 18 mal 29 Zentimeter, aber auch die grafische Gestaltung. Die zahlreichen handschriftlichen Zahlenreihen, etwa die ersten 700 Ziffern der Wurzel aus Zwei zeigend, die übergroß notierten Gleichungen und die Grafiken sind interessante Hingucker. Zeichnungen, die professionell vom Grafikdesigner Helmut Brade angefertigt wurden, vermitteln beim ersten Hinschauen den Eindruck, als habe jemand Skizzen zu den behandelten Themen angefertigt, so wie es die Leser vielleicht auch selbst gemacht hätten. Man erfährt nicht, ob dies die Absicht der Herausgeber war – es gibt weder ein Vor- noch ein Nachwort. An der Professionalität der grafischen Gestaltung besteht kein Zweifel, nur manches Mal hätten zusätzliche schlichtere Darstellungen, die nicht wie bloße Skizzen wirken, das Verständnis besser unterstützt.

Auf den jeweils letzten Seiten eines Kapitels finden sich Aufgaben, die der Autor zur weiteren Beschäftigung gestellt hat. Erfreulicherweise kann man in einem beigefügten Heftchen deren Lösungen nachlesen. Die leeren Seiten mit Rechenkästchen zwischen den Kapiteln werden wahrscheinlich nur wenige für eigene Notizen nutzen. Am Ende des Buchs steht leider nur ein Namensregister (tatsächlich nennt der Autor ziemlich viele Personen) – Stichwortverzeichnis und Literaturhinweise sucht man vergebens. Es empfiehlt sich, bei der Lektüre die Reihenfolge der Kapitel beizubehalten, denn immer wieder greift Barth auf Darstellungen aus vorangehenden Abschnitten zurück.

Zunächst widmet sich der Autor der Frage, was Mathematik eigentlich ist, wie sie entstanden ist, was sie ausmacht, ob sie nützlich ist und schön. Einen Aspekt dieser Ästhetik führt er auf, indem er auf seinen persönlich größten Aha-Moment verweist, in dem er zum ersten Mal den Beweis der gödelschen Unvollständigkeitssätze verstanden hatte. Für Barth war das ein »Erlebnis reinster und unübertrefflicher Schönheit«. Auf die gödelschen Sätze, an denen die Grenzen der mathematischen Erkenntnisgewinnung deutlich werden, geht er später noch überzeugend ein.

In mehreren Abschnitten greift Barth ausgewählte Themen der Mathematikgeschichte auf, etwa die Frage, wie der Übergang von natürlichen Zahlen und Brüchen zu den irrationalen

Zahlen gelang und was Abzählbarkeit von unendlichen Mengen bedeutet (mit einem Exkurs in die cantorschen Verfahren). Das siebte Kapitel trägt den witzig gemeinten Titel »Matratzen-Mathematik«, was auf die kleinsche Vierergruppe der Bewegungen verweist, durch die man eine Matratze in ihre vier möglichen Lagen bringen kann. Der Autor erzählt hier spannend von der Suche danach, wie sich Gleichungen dritten Grades lösen lassen. Er geht auch auf die Geschichte des tragischen Tods von Evariste Galois ein. Dieser hatte als Erster erkannt, dass es gruppentheoretischer Überlegungen bedarf, um die Frage nach der Lösbarkeit von Gleichungen höheren als vierten Grades zu beantworten.

Anhand alltäglicher Situationen verdeutlicht Barth, auf welch vielfältige Weise technisch-wissenschaftliche Verfahren, die auf mathematischen Methoden beruhen, unseren Alltag prägen. Hierzu zählen das Einscannen von Produkten mit GTIN-Code; Bezahlvorgänge mit EC-Karten; Wetter-Apps; GPS-Navigation und vieles mehr – bis hin zur Computertomografie. Auch die Bedeutung der Graphentheorie für die heutige Logistik greift der Autor auf, wobei er sie nur andeuten kann. Die beiden Probleme, die er hier aufführt, lassen sich wohl eher der Unterhaltungsmathematik zurechnen: das klassische Alkuin-Problem eines Fährmanns, der Ziege, Wolf und Kohlkopf über einen Fluss bringen soll; sowie die Lösung des Spiels »Instant Insanity«. Mathematische Probleme in Kinofilmen, vom »da Vinci-Code« bis »A Beautiful Mind«, sind ebenso Thema.

Die Frage, was einen Beweis ausmacht und was man unter der »axiomatischen Methode« versteht, behandelt der Autor ziemlich am Ende seines Werks. Dort hat er auch acht mathematische Probleme zusammengetragen, deren Lösungen er auf sehr verschiedene Weise ausführt, wobei er diverse Strategien überzeugend vorstellt und dabei beantwortet, was mathematische Argumentation und Beweisführung ausmacht.

Insgesamt ein lesenswertes Buch, das sich für alle an Mathematik interessierten Leserinnen und Leser eignet. Man merkt dem gut lesbaren Stil an, dass der Autor jahrzehntelange Erfahrung im Vermitteln mathematischer Inhalte hat. Vermutlich konnte er nur einen Teil seines Erfahrungsschatzes auf den rund 200 Seiten unterbringen. Auf eine Fortsetzung darf man gespannt sein.

Der Rezensent Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

ANTHROPOLOGIE
WIE DER MENSCH ZUM MENSCHEN WURDE

Eher Stammgestrüpp als Stammbaum: Zur Menschwerdung gibt es zahlreiche Hypothesen, die dieses Buch bündelt.

Dierk Suhr ist Biophysiker und beschäftigt sich nicht nur mit Wissenschaftsgeschichte und -theorie, sondern leidenschaftlich gern auch mit der Evolution. Speziell die extrem vielschichtige und komplexe Entwicklungsgeschichte des Menschen fasziniert ihn. Jener Passion folgend, verbrachte er nicht nur ein Sabbatical am renommierten Neanderthal Museum in Mettmann, er verfasste auch dieses Sachbuch. Es soll eine aktuelle Orientierung auf diesem Feld geben, greift dabei viele aktuelle Theorien der Menschwerdung auf und versucht sich an der schwierigen Aufgabe, ein Gesamtbild zu erstellen.



Dierk Suhr
DAS MOSAIK DER MENSCHWERDUNG
Vom aufrechten Gang zur Eroberung der Erde: Humanevolution im Überblick
Springer, Berlin und Heidelberg 2018
231 S., € 18,–

Um es vorwegzunehmen: Der Versuch gelingt recht gut, allerdings mit kleineren Einschränkungen. Die zwölf Kapitel vermitteln auch Laien viel Aktuelles und Wissenswertes aus der Anthropologie und angrenzenden Disziplinen. Suhr fängt wirklich ganz am Anfang an: von der Planetenentstehung über die Bildung der ersten Zellen bis hin zu einem Abriss der relevanten Erdzeitalter. Auch die Evolutionstheorie und das Selbstbild des Menschen im Wandel der Zeiten behandelt er, bevor er schließlich ans Eingemachte geht: die Entwicklung des Menschen nebst wissenschaftlicher Erklärungsversuche. Leser, die entsprechendes Vorwissen bereits mitbringen, können durchaus ein paar Kapitel überspringen und dort einsteigen, wo es für sie spannend wird.

Der Autor erklärt zunächst, welche Voraussetzungen die Menschwerdung hatte, angefangen bei Mutation, Selektion und Zufall bis hin zu den sich ändernden klimatischen Bedingungen der jüngeren Erdgeschichte. Er pflegt einen wissenschaftsnahen und nüchternen Stil, nutzt oft und gern Originalzitate und strukturiert die Inhalte dabei didaktisch sinnvoll. Da er weder Paläontologe noch Primatenforscher oder Anthropologe ist, überlässt er die Bewertung wissenschaftlicher Erkenntnisse anerkannten Experten aus den jeweiligen Themenbereichen. Das ist zu begrüßen. An den Stellen allerdings, wo er aus fremdsprachigen Standardwerken oder Fachartikeln zitiert, wäre eine konsequente Übersetzung wünschenswert gewesen. Nicht alle Leser dürften Französisch auf entsprechendem Niveau beherrschen.

Den Kern des Buchs bilden die Kapitel rund um die Vorläuferspezies des *Homo sapiens* und die zugehörigen Knochenfunde sowie die Theorien um deren jeweilige Verwandtschaftsbeziehungen. Deutlich wird hier, wie sehr der

Buchtitel zutrifft. Denn die diversen Funde sind wirklich ein Mosaik – um mit Suhr zu sprechen: eher ein Stammbusch als ein Stammbaum. Gehören beispielsweise die in der gleichen Bodenschicht, aber an unterschiedlichen Standorten gefundenen Zehenknochen sowie das Unterkieferfragment wirklich zu einer Spezies oder doch zu verschiedenen? Ist jene Knochenform tatsächlich ein ursprüngliches Merkmal oder zeugt sie von der morphologischen Bandbreite lokaler Populationen? Den diesbezüglichen Expertenstreit beleuchtet Suhr umfassend und macht dabei deutlich, wie schwierig sich die Frage nach unserer Herkunft selbst für Fachleute darstellt.

Wasseraffen oder Aasfresser? Unsere rätselhafte Herkunft

Der Band gibt keine definitiven Antworten auf Fragen wie: »Aus welcher Umwelt heraus ist der Mensch entstanden?« oder »Wie kamen wir zum aufrechten Gang und zu unserem großen Gehirn?«. Stattdessen, und das ist seine Stärke, stellt er jeweils mehrere, teils konkurrierende Modelle vor. Trotzdem gelingt es ihm, mögliche Szenarien herauszuarbeiten und den Lesern einen Eindruck davon zu vermitteln, wie es gewesen sein könnte.

Zahlreiche farbige Abbildungen berühmter Fossilien und entsprechender Nachbildungen machen das Ganze anschaulich. Fotos eines rekonstruierten *Homo-ergaster*-Jungen beispielsweise lassen diesen Vorfahren quasi lebendig werden. Einziger Wermutstropfen in jenem Buchabschnitt: Die seitenlange Abfolge von Datierungen, Gehirnvolumen und anderen Merkmalen ist inhaltlich sicher richtig und wichtig, sorgt aber nicht unbedingt für Spannung. Hier merkt man auch, dass eine gewisse Vorbildung dann doch von Nutzen ist. Erklärungen zum Spezieskonzept oder eine Definition, was unter einem Typusexemplar zu verstehen ist, fehlen.

Nachdem Suhr die verschiedenen Theorien zur Menschwerdung vorgestellt hat – von der Savannen- über die Wasseraffen-Hypothese bis zum Aasfresser-Modell –, hebt er hervor, welche Eigenschaften uns vermutlich zum Menschen mach(t)en. Hier geht es stellenweise deutlich über Paläontologie und Anthropologie hinaus. Aufrechter Gang, Beherrschung des Feuers oder verändertes Becken sind ja gewissermaßen die Klassiker. Wenn es aber um unser soziales Gehirn geht, streift Suhr philosophie- und sozialtheoretische Konzepte, etwa die Intersubjektivität. Darunter versteht man die von Individuen und Gruppen geteilte Wahrnehmung der Wirklichkeit, die ein Grundstein menschlicher Zivilisationen sei. Auch einen Exkurs in die evolutionäre Kognitionsforschung unternimmt der Autor: Wie ist unser Gehirn entstanden, warum haben wir Bewusstsein, welchen evolutionären Vorteil gewährt es, und können wir eigentlich unseren eigenen Verstand begreifen? All das bietet reichlich Stoff zum Nachdenken und stellt sicher einen größeren Mosaikstein der Menschwerdung dar.

Insgesamt liefert der Autor eine aktuelle Übersicht über Evolutionsmodelle der Menschwerdung ab. Man findet einzelne Inhalte sicher noch ausführlicher in anderen Sach- und Fachbüchern, aus denen er teilweise auch zitiert. Kompakt, übersichtlich, interdisziplinär und mit großer Themenvielfalt bietet das Buch aber klare Vorzüge. Als weiteren Service gibt es die E-Book-Version kostenlos dazu.

Der Rezensent Arne Baudach ist Doktorand der Biologie in Gießen.

QUANTENPHYSIK
SCHÖNE NEUE WELT

Aus der heutigen Technik ist die Quantenphysik nicht mehr wegzudenken. In der Zukunft könnte sie unser Leben radikal verändern, meint der Fachautor Lars Jaeger.



Lars Jaeger
DIE ZWEITE QUANTEN-REVOLUTION
Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen Supertechnologien
Springer, Berlin, Heidelberg 2018
562 S., € 22,98

Zwei Seelen wohnen, ach!, in Jaegers Brust. Zum einen ist da der promovierte Physiker, der auf dem Gebiet nichtlinearer dynamischer Systeme geforscht hat, zum anderen der Finanzunternehmer und Hedgefonds-Analytiker. Beide Seelen zusammen bilden einen äußerst agilen Blogger und Sachbuchautor, der aktuelle Trends analysiert und in die Zukunft zu extrapolieren sucht. Im vorliegenden Werk prognostiziert er eine »zweite Quantenrevolution«, aus der »neue Supertechnologien« hervorgehen sollen.

Von nicht wenigen Autoren, die aus der rasanten Entwicklung von Wissenschaft und Technik wahlweise auf eine rosige Zukunft schließen oder den baldigen Untergang der Menschheit vorhersagen, unterscheidet sich Jaeger vorteilhaft durch solides Wissen über Quantenphysik. Zwar schwelgt er in der typischen Übertreibungsrhetorik, mit der Vortragende bei Managerseminaren um die Aufmerksamkeit schläfriger Zuhörer buhlen, aber die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelegten Grundlagen der »ersten Quantenrevolution« stellt er sehr kompetent dar.

Wie Jaeger hervorhebt, nutzen die Mikroelektronik und Computertechnik, die heute den Alltag beherrschen, viele exotisch anmutende Phänomene der Mikrowelt, unter anderem den berühmten Tunneleffekt. Dass Ladungsträger Potenzialbarrieren, die gemäß klassischer Physik unüberwindlich wären, quantenmechanisch »durchtunneln« können, ermöglicht beispielsweise fortgeschrit-

tene Transistoren und Datenspeicher.

Den Ausgangspunkt einer gerade beginnenden »zweiten Quantenevolution« sieht Jaeger vor allem im Phänomen der so genannten Verschränkung, die das Schicksal quantenmechanisch entsprechend präparierter Mikroteilchen über makroskopische Distanzen hinweg zu verknüpfen vermag. Darauf beruhen Prototypen künftiger Quantencomputer sowie erste gelungene Versuche, Daten mittels verschränkter Photonen absolut abhörsicher über große Entfernungen zu übertragen.

Während dem Autor seine Physikerseele bei der bündigen Darstellung quantenmechanischer Zusammenhänge gute Dienste leistet, lässt ihm seine zweite Seele – die des Unternehmers – beim Ausmalen der schönen neuen Quantenwelt arg die Zügel schießen. Zwar ist nach einem Diktum des Sciencefiction-Autors Arthur C. Clarke »jede hinreichend fortgeschrittene Technologie nicht mehr von Magie zu unterscheiden«. Daher sind der Vorstellungskraft bei Prognosen kaum Grenzen gesetzt – solange es sich um technologische Vorhersagen handelt. Hier sollte man Jaegers blühende Fantasie gar nicht kritisieren.

Anders sieht es freilich aus bei den wirtschaftlichen und allgemeingesellschaftlichen Folgen technischer Innovationen. Da outet sich der Autor als naiver Technikoptimist. Bald, so Jaeger, werde es einen »Quanten-3-D-Drucker« geben, mit dem man einzelne Atome »auf Knopfdruck oder gar per Gedankensteuerung nahezu beliebig anordnen« kann. Damit »wird jeder unmittelbar das haben, was er sich gerade wünscht. Wenn es keinen Mangel an Gütern und Ressourcen mehr gibt«, zeichne sich eine Wirtschaftsform ab, »in der Besitz nicht mehr zählt«. Worauf die rhetorische Frage folgt: »Wären dann alle Menschen wirklich sozial gleichgestellt?«

Gegen den utopischen Techno-Kommunismus, der automatisch das Geld abschafft, weil alles Open Source ist, spricht schon die einfache Beobachtung, dass jede neue Technologie zunächst exklusiv ist. Oft wird sie geheim in Militärlabors entwickelt, und wenn sie auf den Markt kommt, dann zu hohen Preisen. Technik ist nicht von sich aus demokratisch. Meist verschärft sie sogar den Gegensatz von Besitzenden und Habenichtsen.

Jaeger bemerkt am Ende selbst, dass sich neue Technologien nicht einfach idealtypischen Marktmechanismen unterordnen, sondern eher die Entstehung wirtschaftlicher Monopole fördern – man denke nur an Google oder Facebook. Deshalb fordert er: »Die ethische Bewertung und politische Gestaltung zukünftiger Technologien muss über die kommerziellen oder militärischen Interessen einzelner Personen, Unternehmen oder Staaten hinausgehen.« Das ist schön gesagt, lässt aber entscheidende Randbedingungen der angekündigten Quantenrevolution im Unklaren.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

GESCHICHTE

AUF DEN SPUREN DER ANTIKE

Ein anspruchsvoller Reiseführer, der unter dem bereits Bekannten das Besondere erkennen lässt.

Mit diesem Buch präsentiert der Althistoriker Martin Zimmermann eine Art Reiseführer zu außergewöhnlichen Orten. Es geht um Stätten mit historischem Hintergrund, meist in der Mittelmeerregion gelegen und abseits der üblichen Reiserouten, so dass sie dem touristischen Auge normalerweise verborgen bleiben. Insgesamt stellt der Autor 40 Lokalitäten vor, die er in zehn Themenkomplexen gruppiert – von »Orte des Krieges« über »Geisterstädte« bis zu »Orte des Wissens«. Der Band ist allerdings ziemlich anspruchsvoll und verhält sich zum Baedecker-Reiseführer ungefähr so wie dieser zu einem Mickey-Mouse-Heft: Auf den Seiten tummeln

Martin Zimmermann
DIE SELTSAMSTEN ORTE DER ANTIKE
C.H. Beck, München 2018
336 S., € 22,–

sich Homer und Platon, Strabon und Marc Aurel, Pompeius und Oktavian, Kimon und Peisistratos. Das macht die Lektüre nicht eben einfach. Das Buch taugt daher nur sehr eingeschränkt zur Reiselektüre, zumal ein Register fehlt, auf das die Leser zurückgreifen könnten.

Zimmermann kann als Professor für Alte Geschichte auf ein fundiertes Wissen zurückgreifen, und so ist das Buch prall gefüllt mit Informationen. Leider vermisst man Belege, denn es ist kein Literaturverzeichnis enthalten. Die Dichte des Schreibstils belegen Sätze wie dieser: »Als Athenaios die Papyrusrolle mit dem Werk des Kallixeinos in der Bibliothek von Alexandria studierte, hat er staunend gelesen, was der rhodische Gelehrte in den Tagen des Königs Ptolemaios IV. Philopator selbst aus Berichten exerpiert hatte …«. Wer die nötige Konzentration hierfür beim Lesen aufbringt, wandelt gedanklich aber tatsächlich in der Akademie Platons, in Troias Landschaften oder geht in Apameia, in der Gegend des heutigen Syriens, auf antike Elefantenjagd.

Bernadett Fischer ist Historikerin und in der Öffentlichkeitsarbeit eines Museums tätig.

DIGITALISIERUNG
BIG OTHER SIEHT DICH

Die Harvard-Ökonomin Shoshana Zuboff liefert eine umfassende Kritik an der Plattformökonomie der Technologiekonzerne.

Der Datenskandal um die Analysefirma Cambridge Analytica, bei dem Informationen von 87 Millionen Facebook-Nutzern weitergegeben wurden, hat der Öffentlichkeit einmal mehr vor Augen geführt, dass Onlineidentitäten zu handelbaren Gütern geworden sind. Dass Nutzer Onlinedienste wie Facebook oder Google mit ihren Daten »bezahlen«, ist mittlerweile ein Allgemeinplatz. Diese Technologiekonzerne bieten ihre Dienste nur vermeintlich kostenlos an; tatsächlich erheben sie den Preis, die Nutzer zu durchleuchten, um passgenaue Werbung zu schalten. Die Harvard-Ökonomin Shoshana Zuboff hat dafür schon vor einiger Zeit den Begriff des »Überwachungskapitalismus« geprägt. In ihrem neuen, 727 Seiten starken Werk analysiert sie dieses Motiv in allen Facetten.

Zuboff definiert den Überwachungskapitalismus als »neue Marktform, die menschliche Erfahrung als kostenlosen Rohstoff für ihre versteckten kommerziellen Operationen der Extraktion, Vorhersage und des Verkaufs reklamiert.« Kennzeichnend für diese Mutation des Kapitalismus sei, dass Maschinenintelligenz als neues Produktionsmittel überschüssige Nutzerdaten, den so genannten Verhaltensüberschuss, zu Vorhersageprodukten verarbeitet, die prognostizieren sollen, was die Nutzer fühlen, denken und tun. Diese Vorhersageprodukte werden auf neuen Absatzplätzen verkauft: den »Märkten für zukünftiges Verhalten«.

Der Akteur, der sich am besten auf diese Raffinierung von Verhaltensdaten versteht, heißt Google. Für Zuboff ist der Konzern ein ähnlich Epoche machendes Unternehmen wie Ford, das mit seiner Fließbandproduktion ein ganzes Industriezeitalter prägte. Google sei es mit seinen algorithmischen Werkzeugen gelungen, jene Rohstoffe, die einst nur Beifang der Websuche waren, in ein wertvolles Produkt zu verwandeln. 2004 habe Googles Werbeplattform Adsense bereits einen Umsatz von täglich einer Million Dollar abgeworfen; 2010 lag der Umsatz bei mehr als 10 Milliarden Dollar im Jahr.



Shoshana Zuboff
DAS ZEITALTER DES ÜBERWACHUNGSKAPITALISMUS
Aus dem Englischen von Bernhard Schmid
Campus, Frankfurt am Main 2018
727 S., € 29,95

Dass die ökonomischen Veränderungen mit Machtverschiebungen einhergehen, ist für Zuboff nur logisch. Die Autorin entwickelt in der Traditionslinie des Behaviorismus die Theoriefigur der »instrumentären Macht«. »Der Überwachungskapitalismus ist der Puppenspieler, der uns durch das Medium des allgegenwärtigen digitalen Apparats seinen Willen aufzwingt«, schreibt Zuboff. Diesen Apparat bezeichnet die Autorin in Anspielung an Orwells »Big Brother« als »Big Other« – das große Andere. Darunter versteht sie die »wahrnehmungsfähige, rechnergestützte und vernetzte Marionette, die das menschliche Verhalten rendert, überwacht, berechnet und modifiziert«.

Das Ziel bestehe nicht in der Beherrschung der Natur, sondern des menschlichen Wesens. »Der Brennpunkt hat sich verschoben: von Maschinen, die die Grenzen des Körpers überwinden sollten, hin zu Maschinen, die das ubiquitäre Wissen dazu einsetzen, im Dienste von Marktzielen das Verhalten von Einzelnen, Gruppen und Populationen zu verändern«, konstatiert Zuboff. »Diese globale Implementierung instrumentärer Macht überwindet und ersetzt die Innerlichkeit des Menschen, die sowohl den Willen zum Wollen als auch unsere Stimme in der ersten Person nährt. Damit trägt sie dazu bei, dass die Demokratie schon an der Wurzel verkümmert.« Der Überwachungskapitalismus sei inhärent antidemokratisch und antiegalitär, er privatisiere und konzentriere das Wissen und oktroyiere uns die sozialen Beziehungen einer »vormodernen absolutistischen Autorität« auf.

Zuboff, vielen Lesern noch aus den großen Debatten im Schirrmacher-Feuilleton der FAZ bekannt, ist eine wortgewaltige Kritikerin der Plattformökonomie. Bereits 1988, lange bevor Google & Co gegründet wurden, legte sie mit ihrem Werk »In the Age of the Smart Machine« eine profunde Analyse der

Informationstechnologien und Machtbeziehungen vor. Auch in ihrem jüngsten Buch beweist sie Sachverstand, der weit über ihren ökonomischen Hintergrund hinausreicht. Schonungslos legt sie die manipulativen und teils menschenverachtenden Geschäftspraktiken der Techkonzerne offen. Kenntnisreich und für den Leser allgemein verständlich beschreibt Zuboff die Entstehung eines neuen Markts, der die GAFA-Konzerne (Google, Apple, Facebook, Amazon) zu den wertvollsten Unternehmen der Welt gemacht hat. Man kann das Werk schon jetzt neben Thomas Pikettys »Das Kapital im 21. Jahrhundert« (2014) oder Jaron Laniers »Wem gehört die Zukunft?« (2014) einordnen.

Das analytische Verdienst der Autorin besteht darin, dass sie nicht nur die ökonomischen Aspekte, sondern auch die gesellschaftlichen Implikationen in den Blick nimmt: Der ungezügelte Raubbau an Verhaltensdaten, so die These, führe zu einer »unbefugten Enteignung menschlicher Erfahrung« und »Aufhebung des natürlichen Rechts auf Freiheit«. Was also ist zu tun? Zuboff schreibt: »Wenn wir die Demokratie in den kommenden Jahrzehnten erneuern wollen, brauchen wir dazu das Gefühl der Entrüstung, ein Gespür für den Verlust dessen, was man uns da nimmt.« Der Auftakt zu diesem Reflexionsprozess ist mit diesem Buch gelegt.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf www.spektrum.de.

LESERBRIEFE

NEUARTIGER WASSERSTOFFSPEICHER

Die »Chemischen Unterhaltungen« propagierten die Umwandlung von Ökostrom in Methan, um wetterbedingte Schwankungen bei seiner Erzeugung abzufedern. (»Elektrochemischer Speicher für grünen Strom«, **Spektrum** September 2018, S. 62)

Daniel Gembris, per E-Mail: In dem Artikel heißt es: »Allerdings ist Wasserstoff äußerst flüchtig. Das macht den Transport und die sichere Lagerung entsprechend aufwändig und erfordert spezielle Druckbehälter.« Inzwischen hat es in der Wasserstoff-Technologie einen wichtigen Fortschritt gegeben: Man hat herausgefunden, dass Wasserstoff in einem industriell bereits länger genutzten Öl gut löslich ist und sich auf die Weise sicher lagern und transportieren lässt. Vermarktet wird die Technologie von dem Unternehmen Hydrogenious. Die Energiedichte liegt mit etwa 2,3 Kilowattstunden pro Kilogramm mindestens um eine Größenordnung oberhalb der von Lithium-Ionen-Akkus.



MIKRO- STATT NANOMETER

Nach neuesten Fossilienfunden könnten primitive Einzeller schon vor über vier Milliarden Jahren existiert haben. (»Auf den Spuren der ältesten Fossilien«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 46)

Julian Joppich, per E-Mail: Erst einmal vielen Dank für die guten, vielseitigen und interessanten Hefte, die Sie jeden Monat herausbringen! In dem Artikel haben sich allerdings zwei wortwörtlich kleine Fehler eingeschlichen. Ich konnte mir als Absolvent in einem Studiengang der Mikro-/Nanowissenschaften nicht so recht vorstellen, mit welchem Verfahren man farbige Bilder mit einer solchen Auflösung wie auf S. 49 machen kann und was das auf S. 50 wohl für eine Spitze ist, auf der die Probe fixiert ist. Dann habe ich mal in die Originalarbeiten geschaut – in **Spektrum** sind die Skalen jeweils mit Nanometer beschriftet, in den Originalen in Mikrometer angegeben. Das fand ich dann wieder sehr plausibel.

UNTERSCHIEDLICHES ÜBEREINSTIMMUNGSMASS

Die vermeintlich letzten Wildpferde sind in Wahrheit verwilderte Nachkommen von Hauspferden. (»Die Ahnen der Przewalski-Pferde«, **Spektrum** November 2018, S. 36)

Peter Lemmen, per E-Mail: Im genannten Artikel findet sich der Satz: »Das Erbgut dieser Tiere stimmt im Schnitt nur zu 2,7 Prozent mit dem der Botai-Pferde überein.« Da



LOFL069 / GETTY IMAGES / ISTOCK

Przewalski-Pferde galten lange als letzte überlebende Wildpferde. Jetzt stellte sich heraus, dass sie wohl verwilderte Nachkommen der ersten Hauspferde sind.

andererseits das Erbgut des Menschen mit dem des Schimpansen zu über 99 Prozent übereinstimmt, muss hier wohl ein unterschiedliches »Übereinstimmungsmaß« verwandt worden sein. Könnte das bitte erklärt werden?

Antwort des Autors Roland Knauer:
Die Formulierung ist in der Tat missverständlich. Gemeint ist folgender Sachverhalt: »Das Erbgut der Pferde aus den letzten 4000 Jahren verrät, dass unter ihren Vorfahren nur 2,7 Prozent Botai-Pferde waren.« Wissenschaftlich exakter wäre die Formulierung, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent der Anteil der Botai-Pferde unter den Vorfahren zwischen 2,0 und 3,8 Prozent liegt.

NICHT ÜBERTRAGBAR AUF REALE WELT

Computerprogramme erreichen bei diversen Spielen innerhalb weniger Stunden Weltklasseniveau.
(»Spielend Lernen«, **Spektrum** November 2018, S. 72)

Marius Göcke, Hannover: Das Problem der Übertragbarkeit der Berechnungsergebnisse von künstlicher Intelligenz auf die reale Welt ist, dass diese wesentlich mehr Parameter hat, die es zu beachten gilt. Bei Spielen wie Schach oder Go gibt es nur relativ wenige Regeln, die klar definiert und alle bekannt sind. Das bietet beste Voraussetzungen zum Lernen. Die Algorithmen, die das spielend können, wird man auch in Zukunft nur schwer für naturwissenschaftliche oder medizinische Probleme einsetzen können, weil so viele Variablen (noch) unbekannt sind. Bei sozialen, gesellschaftlichen und linguistischen Themen ist menschliches Vorwissen sogar erforderlich, damit eine künstliche Intelligenz mit ihren Berechnungen überhaupt zu Ergebnissen kommen kann, die dann im Rückschluss wieder mit unserer Gesellschaft und unseren Wertvorstellungen kompatibel sind.

WIE DICK IST DAS ARKTISCHE EIS?

Die Meeresforscherin Jennifer A. Francis berichtete über den dramatischen Klimawandel in der Arktis. (»Auf dünnem Eis«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 52)

Klaus Müller, Freinsheim: Im Beitrag wird die maximale Ausdehnung des arktischen Eises mit rund 15 Millionen Quadratkilometern angegeben. Unter der Annahme, dass diese im Winter erreicht wird, passt das angegebene Wintereisvolumen von etwa 15 000 Kubikkilometer meines Erachtens nicht dazu, dann wäre das Eis nämlich im Durchschnitt nur einen Meter dick. Das kommt mir trotz des erschreckenden Klimawandels doch etwas dünn vor.

Antwort der Redaktion:
Die Meereisdicke gilt derzeit als einer der am schwierigsten zu messenden Parameter des arktischen Klimas, daher fehlen noch flächendeckende langjährige Datensätze hierzu. Die Schätzungen liegen im Bereich von Zentimetern bis zu wenigen Metern, so dass die Größenordnung zur Ausdehnung und zum Volumen des Wintermeereises passt.

INSPIRIERT ZU EIGENEN VERSUCHEN

Wie erreicht man, dass Spagetti beim Verbiegen nur in zwei Teile zerbrechen? (»Lösung eines legendären Spagetti-Rätsels«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 10)

Björn und Marc Allef, per E-Mail: Der Artikel hat uns zu einer eigenen Versuchsreihe inspiriert. Zwei Probanden wurden auserkoren, die Spagetti einer Eigenmarke des örtlichen Handels zu brechen. Wir haben keine Kosten und Mühen gescheut und drei verschiedene Destruktionsverfahren analysiert. Bei einer statistischen Analyse der Ergebnisse entdeckten wir einen nicht zu vernachlässigenden Faktor: Der grundsätzliche experimentelle Aufbau der Berstversuche erwies sich als vergleichsweise irrelevant, wichtiger scheint die Dynamik des Versuchs zu sein.

Wir haben drei Verfahren untersucht: 1. Bersten durch Kippen der beiden in den Händen fest eingespannten Enden als Zwei-Gelenk-Stab mit zwei verkippenden festen Enden, 2. Bersten durch mechanische Überlastung der Spagettistange als Zwei-Gelenk-Stab mit zwei losen Enden, 3. Bersten durch Torsion wie bei den Ingenieuren um Ronald H. Heisser.

Das Ergebnis ist eindeutig: Hohe Dynamik sorgt fast immer für mehrere Bruchstücke. Allerdings ist bei jedem der drei Verfahren die Anzahl der Bruchstücke deutlich geringer, wenn die Belastungszeit der Spagetti kurz vor Erreichen der Bruchkraft etwas verlängert wurde. Bei allen drei Verfahren ließ sich die Anzahl der genau einmal brechenden Spagetti durch Verlangsamung des Vorgangs deutlich erhöhen.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

KAUSALITÄT IST KOPFSACHE

Physiker streiten über die neue Deutung eines klassischen Experiments zur Realität in der Quantenphysik. (»Kein Ausweg aus der Unwirklichkeit«, **Spektrum** Dezember 2018, S. 12)

Rido Mann, per E-Mail: Wie wird die Welle bei der Messung im ersten der auf S. 15 beschriebenen Versuchsaufbauten zum Teilchen? Das Propagieren der Welle durch den gesamten Raum (Richtung Detektor D1 und Detektor D2) geschieht (unbeobachtet) mit allen möglichen Interferenzen nach der Vorstellung des Experimentators im Laborsystem. Die Energie der Welle kann entweder bei D1 oder bei D2 auftauchen, je nach Interferenzbild und auch nur an einem Ort, weil es nur einen Energiewert gibt, der als solcher erhalten sein muss. Die Verletzung des Kausalprinzips findet hier nur im Kopf des Betrachters statt, der das Koordinatensystem des Labors mit dem des Photons vermischt.

Das eigentlich Merkwürdige sind die Erhaltungssätze (Energieerhaltung, Impuls-, Spinerhaltung) und ihre tieferen Ursachen. Hierin liegt wohl der Grund der Nichtlokalität und Nichtkausalität in der Quantenmechanik. Da die Flugzeit des Photons im System des Photons gemäß der speziellen Relativitätstheorie null ist, befinden sich alle Objekte des Versuchsaufbaus bereits da, wo sie in kausaler zeitlicher Reihenfolge im Beobachtersystem erst aufgebaut werden (2. Strahlteiler, »verzögerte Entscheidung«). Das Photon muss sich gar nicht rückbesinnen um vom Teilchen zur Welle zu werden. Das liegt eben nur im Auge des Betrachters im Laborsystem.

VERRUTSCHTE ELEKTRONENPAARE

In ihrer Kolumne »Chemische Unterhaltungen« stellten Matthias Ducci und Marco Oettken eine verbreitete Klasse von Farbstoffen vor. (»Die bunte Welt der Azofarbstoffe«, **Spektrum** November 2018, S. 68)

Martin Behr, Mörlenbach: Der Artikel war mal wieder eine Freude, enthält aber einen kleinen Fehler: Auf S. 70 unten ist an zwei Stellen ein Elektronenpaar verrutscht, so dass zwei Kohlenstoffatome mit fünf Bindungen auftauchen.

futur III

Begegnung im Central Park

Es ist nicht immer einfach, Kontakt aufzunehmen.

Eine Sciencefiction-Kurzgeschichte von Michael Adam Robson

Weit entfernt in einer tieferen Raumschicht erspürte Es ein Signal – ein Muster, das Intelligenz anzeigte. Neugierig kreierte Es eine Selbstkopie gemäß der lokalen Physik jener Schicht und sandte sie hin, um nachzuforschen.

Die Raumschicht wirkte beengend durch ihre Ausmaße und verwirrend durch ihre Unbestimmtheit und Linearität. Ein heißer Plasmaklumpen beherrschte ihr Ursprungsgebiet, aber in der von ihm ausgehenden Strahlung war kein Muster erkennbar. Nein, das Signal sickerte aus einer Nebenmasse, einem relativ kleinen, kalten Materiehäufchen.

Die Masse war mit für diese Raumschicht typischen selbstreplizierenden Prozessen überzogen. Solche Abläufe bedeuteten gelegentlich eine Form primitiver Intelligenz.

Hier gab es Anzeichen für Industrie; aus dem Chaos wuchsen geordnete Strukturen, eine Grundlage für fortschreitende Technik. Die Masse war dabei, Bewusstsein zu entwickeln. Ein seltener Vorgang – und Es würde dabei zusehen!

Es wählte eine rechteckige Fläche mit chemischem Leben aus, die an allen vier Seiten von großen rechteckigen Strukturen eingefasst war, und unauffällig schuf Es dort eine kleine Selbstverkörperung aus den Bausteinen der örtlichen Chemie.

Eine Ansammlung von Lebensformen stand still da. Vorsichtig glitt Es zu der nächstgelegenen, absorbierte das von ihr reflektierte Licht, inhalierte die organischen Moleküle, die sie verströmte. Als die Kreatur auf die Annäherung nicht reagierte, wickelte Es sich um ihren Stamm und sickerte in das grobe Gewebe. Es krümmte sich und brach der Kreatur einen Zweig ab, um ihre Chemie zu schmecken.

Die Lebensform schien durch eine einfache Reaktion zu leben, indem sie Materie und elektromagnetische Energie verzehrte und in chemische Vorräte umwandelte. Wahrscheinlich diente die Energie der großen Plasmakugel als Hauptantrieb für die chemischen Prozesse auf dieser kleineren Masse.

Einzeln mutete diese Kreatur viel zu primitiv an, um eine Spur von Intelligenz zu besitzen. Vielleicht arbeitete sie im Kollektiv.

Hier gab es Anzeichen für Industrie, aus dem Chaos wuchsen geordnete Strukturen

Es entdeckte Bewegung und bemerkte zum ersten Mal eine Schar kleinerer Wesen, die sich hinter und zwischen den Lebensformen versteckten – möglicherweise deren replizierter Nachwuchs.

Diese Kreaturen waren beweglicher und sie taumelten davon, als Es sich ihnen zuwandte. Mehrere hielten rechteckige Objekte hoch, die bearbeitet wirkten – eine Demonstration von Kunst oder Technik?

Das Rechteck schien für diese Kultur typisch zu sein, vielleicht ein Fetisch, der mit ihrem Replikationsprozess zusammenhing; die Kreaturen selbst waren rundlich geformt und wiesen schwach ausgeprägte Symmetrien auf.

Die Objekte sandten langsame elektromagnetische Wellen aus, die für komplexere Muster codierten. Sie hingen mit dem Signal zusammen, das Es entdeckt hatte! Konnten diese einfachen Maschinen die hier herrschende Intelligenz sein? Es sandte die Wellen zu ihnen zurück, doch ohne merkliche Reaktion.

Es glitt näher, und wieder taumelten die Kreaturen davon, vielleicht geängstigt durch Sein fremdartiges Aussehen. Es hielt an und ballte Seine Masse zu einer rundlichen Gestalt zusammen, die der ihren ungefähr glich.

Von den Wesen gingen Schwingungen aus, wobei ihnen die Luft als Informationskanal diente. Sie kommunizierten, aber den Inhalt verstand Es nicht. Wiederum versuchte Es, die Vibrationen nachzuahmen, und diesmal schien das eine Reaktion hervorzurufen.

Bald schlossen sich weitere neugierige Kreaturen der Menge an. Sie wurden von größeren Maschinen befördert und trugen selbst Geräte von unterschiedlicher Form und Größe – noch eine Präsentation ihrer primitiven Technik.

Einige Wesen steckten mit einem Materieband ein großes Gebiet um Es ab, ein Rechteck innerhalb eines Rechtecks. Es begriff, dass dies ein Ritual war, das Es von der Menge trennen sollte, und deshalb verharrte Es respektvoll innerhalb der gesteckten Grenzen.

Immer mehr Kreaturen kamen herzu, drängten sich an den Grenzen des Rechtecks, zeigten mit ihren Maschinen, erfüllten die Luft mit ihren

Schwingungen. – Und dann hörten die Vibrationen auf.

Die Menge teilte sich, und eine Kreatur kam näher. Sie überquerte die rituelle Grenze und taumelte langsam heran.

Zunächst balancierte die Kreatur bloß auf zwei Gliedmaßen und beobachtete Es. Dann streckte sie ein drittes Glied aus. Eine Opfergabe.

Wie bei der ersten Lebensform, der Es begegnet war, brach Es den Zweig ab und kostete dessen Chemie. Eine warme, eisenreiche Flüssigkeit spritzte über Es.

Die ihres Arms beraubte Kreatur zappelte auf dem Boden, spie Flüssigkeit und erzeugte energiereiche Schwingungen, die von der Menge aufgenommen und verstärkt wiedergegeben wurden. Vielleicht hatte Es einen Replikationsprozess ausgelöst. Wollte die Kreatur chemisches Material mit Ihm austauschen? Aus Höflichkeit stieß Es das Material, mit dem es besprüht worden war, nicht ab, sondern bestrich das Wesen mit ein wenig von Seiner eigenen Masse.

Unterdessen hatten Kreaturen hinter der Menge die großen Maschinen aufgerichtet, die sie herbeigetragen hatten. Ratternde Vibrationen zerrissen die Luft, und Es wurde mit einer Schar kleiner Hochgeschwindigkeitsobjekte beworfen.

Sollte dies eine weitere Technikvorführung sein? Nein, die Objekte waren auf Es gezielt worden, also war das ein erneuter Kommunikationsversuch: Schwingungen kombiniert mit taktilen Signalen.

Es kopierte das Geratter höflich und bewarf die Menge mit einer eigenen Salve von Hochgeschwindigkeitsmasse.

Überall rund um Es zappelten Kreaturen auf dem Boden, stießen Flüssigkeit und Schwingungen aus. Die hemmungslose Darbietung von primitiver Replikationslust wirkte zwar ein wenig verstörend, doch zugleich auch amüsant.

Immerhin endeten nur zu viele Erstkontakte in Missverständnissen oder gar purer Aggression … War diese erotische Begegnung nicht vorzuziehen?

Einige Kreaturen humpelten von dannen; ihre primitiven Lüste waren offenbar befriedigt. Doch ihren Platz nahmen andere ein, und von allen Seiten näherten sich Maschinen, auf dem Boden und aus der Luft. Ermutigt stieß Es ein mächtiges Rattern aus und machte sich auf, sie zu begrüßen.

DER AUTOR

Michael Adam Robson lebt als Ingenieur und Künstler in Vancouver, Kanada. Im Juni 2015 haben wir in **Spektrum** seine SF-Story »Die Marionette« abgedruckt.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M. A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel, Prof. Dr. Michael Wolf.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,–; im Abonnement € 89,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis.
Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq Media Marketing Gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Toulouser Allee 27, 40211 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1. 1. 2018.
Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek





VORSCHAU



KATJABAKUROVA / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DIE UNENDLICHKEIT ZÄHMEN

Die allgemeine Relativitätstheorie liefert für extrem kleine Abmessungen keine sinnvollen Ergebnisse mehr. Auf der Suche nach einem Ausweg haben Theoretiker viele konkurrierende Vorstellungen zur Struktur von Raum und Zeit entwickelt. Doch einige Physiker glauben inzwischen: Wir brauchen auf dem Weg zu einer Quantentheorie der Gravitation möglicherweise keine revolutionären Ideen – sondern einen Strategiewechsel, um die Schwerkraft auf subatomare Skalen umzurechnen.



CRISFOTOLUX / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DAS RÄTSEL DES BEWUSSTSEINS

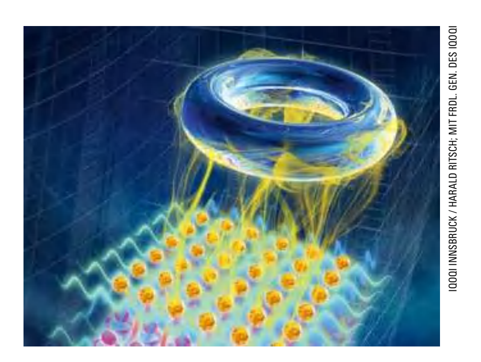
Wie können physikalische Prozesse im Gehirn subjektives Erleben hervorbringen? Gibt es überhaupt ein Bewusstsein, oder ist es nur eine Illusion? Die Entschlüsselung dieser vielleicht markantesten Eigenschaft des Menschen erweist sich als harte Nuss.



ALTMODERN / GETTY IMAGES / ISTOCK

EINE FRAGE DES TIMINGS

Wie gut medizinische Therapien wirken, hängt in vielen Fällen davon ab, zu welcher Tageszeit sie erfolgen. Chronomediziner versuchen daher, die Behandlung auf die innere Uhr ihrer Patienten abzustimmen.



IQOQI INNSBRUCK / HARALD RITSCH; MIT FRDL. GEN. DES IQOQI

TOPOLOGISCHE MATERIALIEN

Bestimmte neue Stoffe könnten die Halbleiterindustrie umwälzen. Um sie zu verstehen, braucht es abstrakte mathematische Konzepte. Was ist das Geheimnis der exotischen Festkörper?

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:
12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abonnement verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Auch als Kombiabo:
Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,–/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Spiel »Ganz schön clever«
Ganz schön clever wollen hier die Würfel gewählt werden. Denn geschickt eingesetzt können diese zu trickreichen Kettenzügen führen. Bei diesem schönen Würfelspiel sind alle Spieler in »noch mal!«-Manier immer am Spielgeschehen beteiligt.



Wählen Sie Ihr Geschenk



Buch »Schnitt! – Die ganze Geschichte der Chirurgie erzählt in 28 Operationen«
Eine faszinierende Reise von den dunklen Anfangszeiten der Chirurgie, als noch ohne Betäubung amputiert wurde, über königliche Operationen bis zu den heutigen Hightech-OPs.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo